



EESTI MAAÜLIKOOL  
Tartu Tehnikakolledž

**Hendrik-Kristjan Sikk**

**RELJEEFI PILDISTAMISE SEADE**  
**REFLECTANCE TRANSFORMATION IMAGING DEVICE**

Rakenduskõrgharidusõppe lõputöö  
Tehnotroonika õppekava

Juhendaja: nooremteadur Erkki Jõgi

Tartu 2018

# LÜHIKOKKUVÕTE

Eesti Maaülikool Fr.R.Kreutzwaldi 1, Tartu 51006		Rakenduskõrgharidusõppe lõputöö lühikokkuvõte	
Autor: Hendrik-Kristjan Sikk		Õppekava: Tehnotroonika	
Pealkiri: Reljeefi pildistamise seade			
Lehekülgi: 90	Jooniseid: 33	Tabeleid: 3	Lisasid: 6
Osakond: Tartu Tehnikakolledž Uurimisvaldkond: T111, Pilditehnika Juhendaja: Erkki Jõgi Kaitsmiskoht ja -aasta: Tartu, 2018			
<p>Käesoleva diplomitöö eesmärgiks on luua kaasaskantav ja lihtsasti kasutatav reljeefi pildistamise seade (<i>RTI</i>). <i>RTI</i> meetod on saripildistamise võte, mille abil sünteesitakse digitaalseid pilte. Sellise tehnikaga tehtud piltidel saab valgustamise nurka interaktiivselt manipuleerida. Töö käigus selgitatakse, milleks ja kellele sellist uurimistehnoloogiat tarvis on. Samuti antakse ka ülevaade <i>RTI</i> tehnoloogia põhimõtetest.</p> <p>Töös püstitatakse nõuded disainitavale <i>RTI</i> seadmele, võttes arvesse sihtgrupi soove, kasutajakogemust ja seadme valmistamist piiravaid reaalseid tegureid. Nõuetest tulenevatele probleemidele leitakse lahendused ja põhjendatakse vastu võetud otsuseid.</p> <p>Põhiline osa diplomitöö raskusasetusest on suunatud mehaaniliste ja elektrooniliste lahenduste väljatöötamisele. Selgitatakse seadme põhiosade mehaanilist ülesehitust ja disaini piiravate probleemide olemust. Kirjeldatakse loogikat, mille järgi on seadmele kujundatud ATMEga32U4 mikrokontrolleriga trükkplaat. Töö sisaldab detailset informatsiooni valitud trükkplaadil kasutatavate elektroonika komponentide kohta.</p> <p>Töö sisaldab ka seadme ehitamiseks vajalike materjalide ja komponentide nimekirja koos ligikaudse maksumusega.</p>			
Märksõnad: <i>RTI</i> , arheoloogia, digitaalne fotograafia, pildistamine, riistvara			

# ABSTRACT

Estonian University of Life Sciences Fr.R.Kreutzwaldi 1, Tartu 51006		Summary of a Professional Higher Education Thesis	
Author: Hendrik-Kristjan Sikk		Specialty: Technotronics	
Title: Reflectance Transformation Imaging device			
Pages: 90	Figures: 33	Tabeleid: 3	Appendixes: 6
Department: College of Technology Field of research: T111, Imaging, image processing Supervisor: Erkki Jõgi Place and date: Tartu, 2018			
<p>The goal of this project is to develop a portable and simple Reflectance Transformation Imaging (<i>RTI</i>) device. <i>RTI</i> is a method that uses series of digital photos in order to create two-dimensional digital images that allow to manipulate illumination angle. This project explains why and for whom this kind of research method is important. An overview of <i>RTI</i> technology is also provided.</p> <p>This project explains the requirements for a portable <i>RTI</i> device design, taking into account the needs of the target group, users experiences and the physical limitations of production. Solutions to the arising problems are covered and substantiated.</p> <p>The main focus of the project is on mechanical and electronic design. Mechanical design and the nature of its limiting factors are explained. The logic behind the custom printed circuit board designed in this project is controlled by ATMega32U4 microprocessor and clarified in detail.</p> <p>This work includes a bill of materials with an approximate cost.</p>			
Keywords: Reflectance Transformation Imaging, Polynomial texture mapping, archaeology, digital photography, imaging, hardware			

## LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

<i>ABS</i>	-	Akrüülnitriilbutadienstüreen, 3D printimiseks kasutatav materja
<i>AWG</i>	-	<i>American wire gauge</i> , Ameerika juhtme mõõtude süsteem
<i>BJT</i>	-	<i>Bipolar junction transistor</i> , bipolaartransistor
<i>CAD</i>	-	<i>Computer-aided design</i> , raalprojekteerimine
<i>Cat5, Cat6, Cat7</i>	-	<i>Category 5, 6, 7 cable</i> , standardiseeritud keerdpaarkaabel, mida kasutatakse arvutivõrkudes
<i>GPIO</i>	-	<i>General-purpose input/output</i> , sisend/väljund viigud
<i>IDE</i>	-	<i>Integrated development environment</i> , integreeritud programmeerimise keskkond
<i>IP Code</i>	-	<i>International Protection Marking</i> , rahvusvaheline kaitseaste, mis näitab elektriseadmete kaitstust välismõjudele
<i>ISO</i>	-	Valgustundlikkust iseloomustav logaritmiline suurus
<i>JTAG</i>	-	Programmi korrigeerimise standard
<i>LDO</i>	-	<i>Low-dropout regulaator</i> . madala lüübispinge alalispingeregulaator
<i>LED</i>	-	<i>Light-emitting diode</i> , valgusdiod
<i>MCU</i>	-	<i>Microcontroller unit</i> , mikrokontroller
<i>MOSFET</i>	-	<i>Metal-oxide-semiconductor field-effect transistor</i> , isoleeritud paisuga väljatransistor
<i>NO</i>	-	<i>Normaly open</i> , tavaasendis on lüliti avatud
<i>N3</i>	-	Ettevõtte Canon standard, millega ühendatakse distantsjuhtimis pult peegelkaamera terminaliga
<i>NPN</i>	-	Negatiivne-positiivne-negatiivne tüüpi transistor
<i>OLED</i>	-	<i>Organic light-emitting diode</i> , orgaaniline valgusdiod
<i>PCB</i>	-	<i>Printed circuit board</i> , trükkplaat
<i>RGB</i>	-	<i>Red, green, blue</i> , värvi mudel, mis on kasutuses visuaalse väljundiga elektroonika seadmetes, põhivärvideks on punane, roheline ja sinine

<i>RISC</i>	-	<i>Reduced instruction set computer</i> , kärbitud käsustikuga arvuti
<i>RTI</i>	-	<i>Reflection Transformation Imaging</i> , saripildistamise võtte pinna iseärasuste uurimiseks
<i>SMD</i>	-	<i>Surface-mount device</i> , elektroonika seadmete tootmise meetod, mille puhul on komponendid joodetud otse trükkplaadi pinnale
<i>USB</i>	-	<i>Universal Serial Bus</i> , universaalne jadasiin

# SISUKORD

SISSEJUHATUS.....	8
1. ÜLEVAADE RELJEEFI PILDISTAMISE TEHNOLOOGIAST.....	10
1.1 Tehnoloogia taust.....	10
1.2 Meetodi kirjeldus .....	10
2. ANALOOGSED SEADMED JA SIHTGRUPI NÕUDED .....	14
2.1 Olemasolevad lahendused.....	14
2.2 Sihtgrupi nõuded.....	18
3. LÄHTEÜLESANDE PÜSTITAMINE .....	20
3.1 Seadme ülesehitus.....	20
3.2 Funktsionaalsed nõuded.....	21
3.3 Konstruksioonilised nõuded .....	22
3.4 Kasutajaliides .....	23
4. SEADME PROJEKTEERIMINE .....	25
4.1 Elektroonika.....	25
4.1.1 Juhtmooduli ja kupli vaheline kommunikatsioon .....	25
4.1.2 LED juhtimise süsteem .....	26
4.1.3 Valguselemendi valik.....	27
4.1.4 LED lülitamise moodul.....	30
4.1.5 Kaamera signaalmoodul.....	32
4.1.6 Toitemoodul .....	34
4.1.7 Mikroprotsessori moodul.....	35
4.1.8 Juhtpaneel.....	36
4.1.9 Ühendusmooduli trükkplaadi disain .....	36
4.1.10 Juhtmooduli trükkplaat .....	37
4.2 Korpused.....	39
4.2.1 Juhtmoodul .....	39
4.2.2 Kuppel.....	41
4.3 Püsivara.....	42
5. PROTOTÜÜP .....	43
5.1 Ehitamine ja testimine.....	43
5.2 Juhtmoodul.....	44
5.3 Hetke olukord ja edasised sammud.....	45
5.4 Seadme võimalikud edasiarendused .....	45
6. MATERJALIDE SPETSIFIKATSIOON .....	47
6.1 Juhtmoodul.....	47
6.2 Kuppel.....	48

KOKKUVÕTE .....	49
KASUTATUD KIRJANDUS .....	51
SUMMARY .....	54
LISA A.....	58
LISA B.....	68
LISA C.....	76
LISA D.....	84
LISA E.....	86
LISA F.....	90

## SISSEJUHATUS

Arheoloogia uurib aineliste allikate põhjal ajalugu. Muistised ehk ajaloo ainelised allikad on erinevad esemete või rajatiste jäänused, mida väljakaevamistel leitakse. Väljakaevamistel eemaldatakse pinnasekiht ning uuritakse põhjalikult läbi selle all avalduv kultuurkiht. Tihtipeale on muistised aja jooksul lagunenud või purunenud ning seetõttu on leitavate detailide arv väga suur ning olemuselt kaootiline. Selleks, et leitud detailidest luua hoomatav süsteem ning need informatiivselt ja ülesleitavalt arhiveerida, on oluline tabada väljakaevatud detailide iseloomulikud omadused. Enamasti tavaline foto vajalikke pinna iseärasusi esile ei too ning tihti on seetõttu meisterlik joonistus eelmainitust parem. Informatiivsete jooniste tegemine nõuab palju aega ning erialaväliseid oskusi või spetsiaalset väljaõpet.

Käesoleva töö eesmärgiks on projekteerida seade, mis võimaldaks arheoloogidel teha väljakaevamistel leitavatest detailidest lihtsalt ja vähesel ajakuluga pilte. Sellise seadme arendamise idee on tulnud arheoloogide vajadusest, sest turul puudub nende nõuetele vastav toode. Samuti pakub projekt autorile võimalust arendada enda oskusi elektroonika ja raalprojekteerimise vallas.

Eesmärgi saavutamiseks võeti ette järgnevad etapid:

1. Valdkonna uuring ja nõuete väljaselgitamine;
2. Lähteülesande püstitamine;
3. Seadme projekteerimine;
4. Prototüübi juhtmooduli valmistamine;
5. Prototüübi juhtmooduli testimine;
6. Seadme püsivara disainimine.

Töö ülesehitusel on arvetatud töö etappide loomulikku järgnevust. Esimene peatükk annab lugejale teadmised valdkonnast, mis selgitavad edaspidi vastuvõetavate otsuste tagamaid. Teises peatükis uuritakse olemasolevaid lahendusi, analoogsete seadmete patente ja sihtgrupi



nõudeid. Kolmandas peatükis defineeritakse täpselt projekteeritava seadme parameetrid ja kirjeldatakse tekkinud ülesannete lahendusi. Neljandas peatükis disainitakse korpuse komponendid, elektroonikamoodulid ja püsivara. Viiendas osas kirjeldatakse prototüübi ehitamise ja katsetamise protsessi, antakse ülevaade projekti hetke olukorrast ning edasistest planeeritavatest sammudest. Lisaks pakutakse välja võimalikud seadme edasiarendused. Viimases, kuuendas peatükis tuuakse välja seadme ehitamiseks vajalike komponentide nimekirjad.

Töös kasutatakse üldlevinud teadmisi elektroonika vallas, teavet analoogsete projekteeritud seadmete dokumentatsioonidest ning uuritakse artikleid ja interneti väljaandeid vajaliku teabe hankimiseks. Projekti sooritamise meetod on teoreetiline taustauuring ja praktiline inseneritöö erinevate arvutiprogrammidega. Täpselt kirjeldatakse programmide olulisust antud temaatika kontekstis.

# 1. ÜLEVAADE RELJEEFI PILDISTAMISE TEHNOLOOGIAST

## 1.1 Tehnoloogia taust

Selle peatüki eesmärgiks on anda ülevaade reljeefi pildistamise tehnoloogiast *RTI* (*Reflectance Transformation Imaging*). Selle teabe põhjal on võetud vastu hilisemad otsused seadme disainimisel ning samuti saab arusaadavaks ka seadme olulisus selle kasutajaskonnale. Siinkohal on oluline ära märkida, et *RTI* ei ole ainus kaasaskantav, kättesaadav ja soodne meetod, mida arheoloogid kasutavad. Teiste hulgas võib välja tuua näiteks 3D mudelite loomise fotogramm-meetria abil. *RTI* on selles töös valitud meetodiks just sihtgrupi ehk arheoloogide huvi tõttu sellise seadme vastu. *RTI* tehnoloogial on teisigi kasutusvaldkondi, näiteks kasutavad seda meetodit ka kriminalistika valdkonna uurijad asitõendite analüüsimiseks. [1]

*RTI* tehnoloogia on arheoloogide hulgas populaarust koguv meetod pärimuskultuuri ainelise teabe talletamiseks ning hilisemaks teaduslikuks uurimiseks. Eesti keeles puudub terminile *RTI* keeleliselt korrektne ja arusaadav vaste. *RTI* valgustustehnoloogia arendati algupäraselt välja Tom Malzbenderi poolt aastal 2001 Californias ettevõtte Hewlett-Packard laboratooriumides. Seal uuriti võimalusi, mille abil saaks tõsta arvutimängude graafika kvaliteeti. [2]

## 1.2 Meetodi kirjeldus

*RTI* on meetod, mille abil on võimalik detailselt uurida objekti, selle kuju ja reljeefi. *RTI* pildid on loodud informatsioonist, mida saadakse seeria digitaalsete fotode tegemisel ühest statsionaarsest kaamera positsioonist. Iga foto puhul langeb valgus pildistatavale objektile erinevast suunast. Selline protsess loob detailist pildi, mis talletab endas informatsiooni kõigis kaadrites esile tõusnud ja varju jäänud pinna iseärasustest. Erinevate piltide valgustuse informatsioonist sünteesitakse matemaatiliselt pinna mudel, mis lubab interaktiivselt valgustada uuritavat keha ning analüüsida selle pinna iseärasusi ekraanil. Iga *RTI* pilt sarnaneb ühe 2D digitaalse fotoga. Erinevalt tavalisest digitaalsest fotost on peegeldamise informatsioon

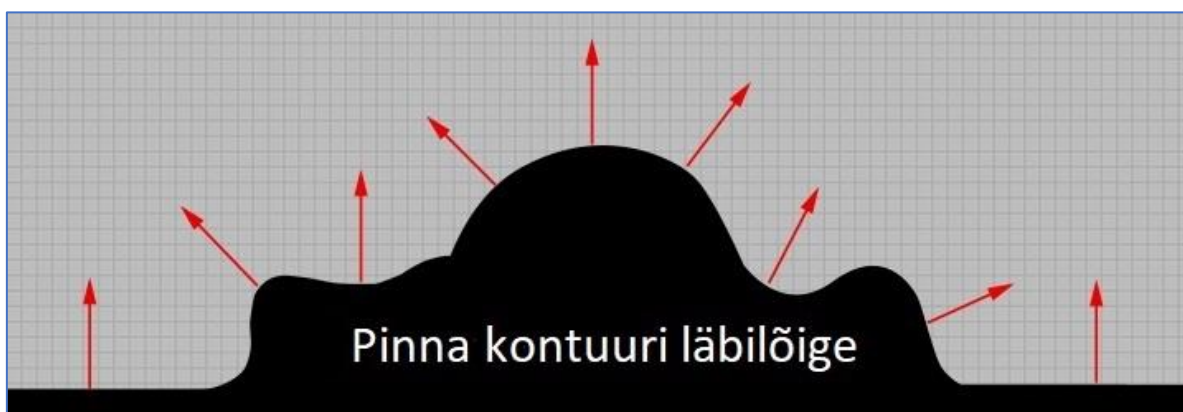
deriveeritud kolmemõõtmelise objekti pinna järgi ja talletatud pildile, mistõttu *RTI* foto „teab“, kuidas valgus objektilt peegeldub. [3]



**Joonis 1.1.** Pinna reljeefi võrdlus. Kaader on võetud videost, mis selgitab *RTI* võimalusi papüüruse fragmendi põhjal. [4]

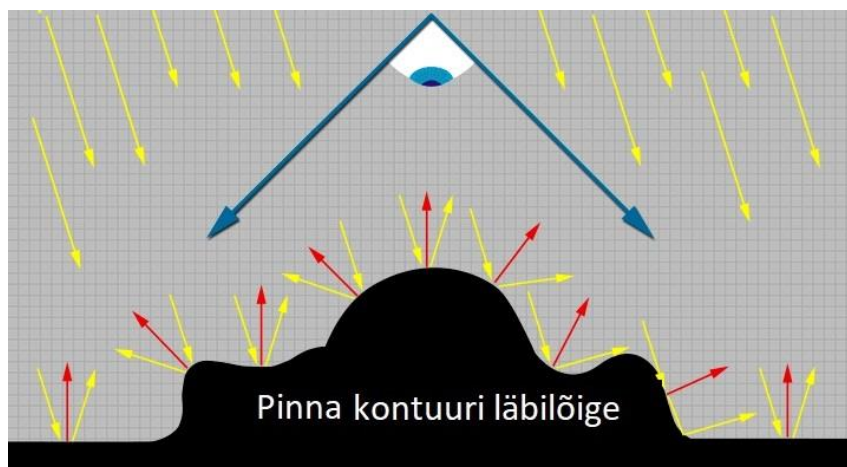
*RTI* sarivõtte kaudu saadud interaktiivset pilti on võimalik matemaatiliste algoritmide abil parendada, tuues sellega esile uut informatsiooni, mida pole võimalik palja silmaga uurides tuvastada. Näidis töötlemise abil esile tulevast informatsioonist pinna kohta on kujutatud joonisel 1.1.

Joonisel 1.2. on kujutatud pinna kontuuri läbilõige, millele on märgitud punaste nooltega pinna punktidega risti asetsevad vektorid ehk pinna normaalid. Risti samale punktile langev valgus peegeldub sarnaselt normaaliga.



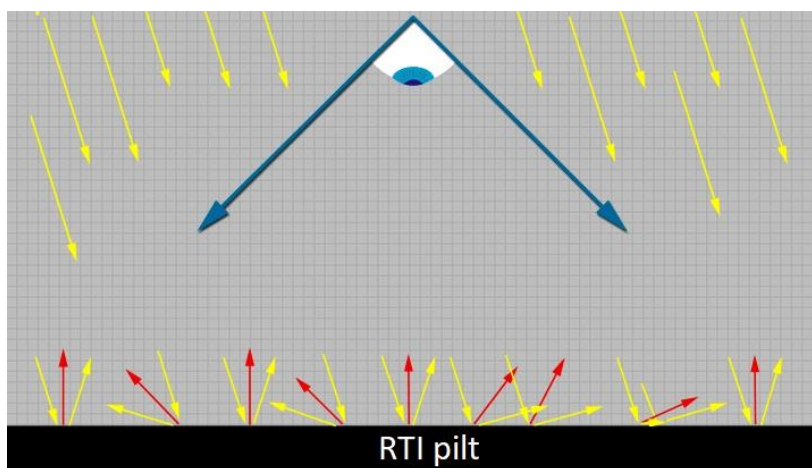
**Joonis 1.2** Pinna kontuuri läbilõige. [3]

Joonisel 1.3. märgib silm kaamera asupaika ning kollased jooned tähistavad valgust, mis on suunatud kontuurile. Valgus peegeldub pinnaselt selliselt, et nurk langeva ja peegelduva kiire vahel on pinnanormaali suhtes võrdne. Kaamera on fikseeritud asendis sarivõtte jooksul. Kuna iga kaadri puhul on teada valgusallika positsioon ja kuna iga kaader tehakse ka erinevast valguse positsioonist, saab *RTI* tarkvara arvutada pinnanormaali iga piksli kohta pildil.



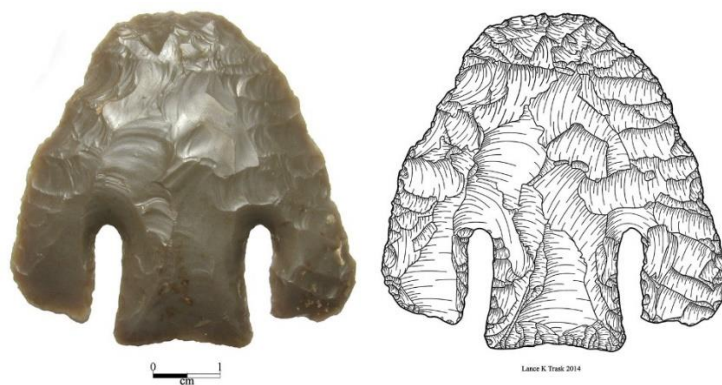
**Joonis 1.3.** Pinna kontuuri läbilõige ja suunatud valgus. [3]

Matemaatiline pinnanormaali informatsioon on salvestatud iga piksli kohta. Samuti salvestub ka punase, rohelise ja sinise värvi informatsioon, mida kannab endas tavaline 2D digitaalne foto. Joonis 1.4. visualiseerib *RTI* poolt salvestatavat valgustatuse informatsiooni.



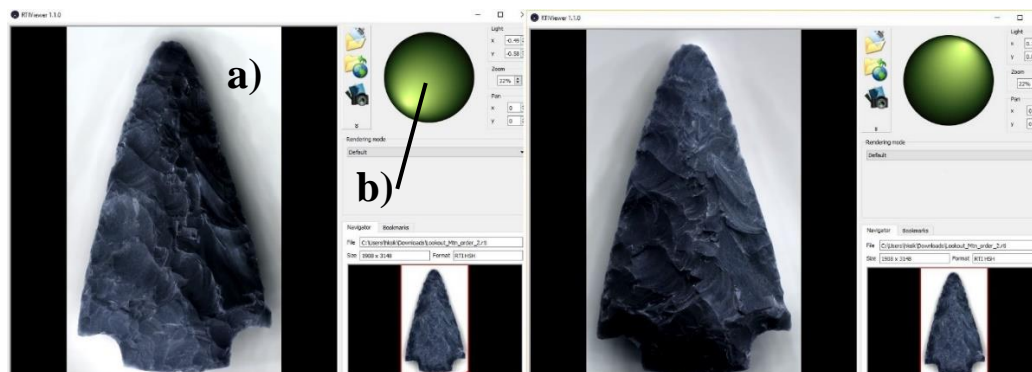
**Joonis 1.4.** *RTI* valgustatuse informatsiooni visualiseering. [3]

Joonisel 1.5. võrreldakse digitaalset fotot ja meisterliku joonistaja poolt tehtud kujutist. Digitaalne foto annab edasi küll värvi ja kuju informatsiooni, kuid iseloomulikud reljeefi tunnused tulevad paremini esile joonistusel.



**Joonis 1.5.** Digitaalse ja käsitsi tehtud kujutise võrdlus. [5]

Internetist on võimalik leida erinevaid *RTI* faile. Joonisel 1.6 on kuvatõmmis vabavarana saada olevast programmist RTIViewer, milles kujutatakse faili *Modern obsidian point (RTI)*. [6]. Tarkvara kuvab pildil vulkaanilisest klaasist odaotsa.



**Joonis 1.6.** Programmi RTIViewer kuvatõmmis obsidiaanodaotsast kahe erineva valgusnurga alt. a) Interaktiivne pilt objektist, b) valguspositsiooni rakendus. [6]

Joonisel 1.6 on näha ka interaktiivne valguspositsiooni muutmise võimalus. Odaotsa erinevad reljeefid on esile toodud varieeruva suunaga külvalguse poolt. Kuvataval *RTI* pildil on võimalik lisaks digitaalse foto värvi ja kuju tabamisele interaktiivselt esile tuua ka iseloomulikud pinnareljeefid.

## 2. ANALOOGSED SEADMED JA SIHTGRUPI NÕUDED

### 2.1 Olemasolevad lahendused

Esmane teave jõudis *RTI* seadmete kohta käesoleva töö autorile sihtgrupi kaudu. Arheoloogid tutvustasid seadme töö põhimõtet ning esitasid nõuded, mis on nende jaoks olulised, mida hetkel olemasolevad lahendused ei paku. Käesolevas peatükis uuritakse erinevaid kasutuses olevaid *RTI* lahendusi, sarnaseid tooteid ja analoogsetele seadetele võetud patente. Oluline on siinkohal märkida, et 2. peatükis ei defineerita ära seadme täpseid parameetreid, vaid selgitatakse sihtgrupi poolt esitatud nõudmisi.

Patentide andmekaeveks kasutati portaali Espacenet, mis võimaldab ülemaailmset patendiotsingut. *RTI* seadme teemalisi patente on leheküljelt leida ainult üks — Ameerika Ühendriikides registreeritud patent koodiga US2016116825(A1). [8]

Tänapäeval kasutatavate lahenduste puhul peab suuremate objektide, näiteks seinamaalingute, pildistamisel osalema kaks või rohkem inimest. Joonisel 2.1. on näha suure objekti pildistamine, kus digitaalne fotokaamera asetatakse statiivile statsionaarsesse asendisse suunatuna jäädvustatavale objektile. Portatiivset valgusallikat liigutatakse jäädvustatava eseme suhtes erinevatesse positsioonidesse ning tehakse seeria pilte.





**Joonis 2.1.** Suurte objektide *RTI* pildistamine [9].

Hilisemaks valgussuuna tuvastamiseks asetatakse selle meetodi puhul pildistatava seadme kõrvale läikiv metallist kuul. Valguse peegeldumise järgi kuulil on *RTI* pildi sünteesimistarkvaral võimalik tuvastada valgusallika asukoht. Nagu eelnevalt öeldud, on selline pildistamismeetod mõistlik vaid suurte objektide puhul, väiksemate objektide puhul on selline tööprotsess liiga aja- ja tööjõu kulukas [9].

Joonisel 2.2. on näha keskmise suurusega objektide pildistamiseks kasutatav kuppel. Selliste esemete uurimiseks kasutatakse *RTI* rakiseid, millel on valguselemendid. Need rakised on üldiselt statsionaarselt asetatud laboritesse, sest on rasked ning mõõtmetelt suured. Kupli suurusest olenevad ka uuritava objekti võimalikud mõõtmed. Selle panevad paika tehnilised omadused:

1. Kaamera sensori pinna tüüp ja suurus;
2. Objektiivi fookuskaugus;
3. Kaamera töökaugus objektist.



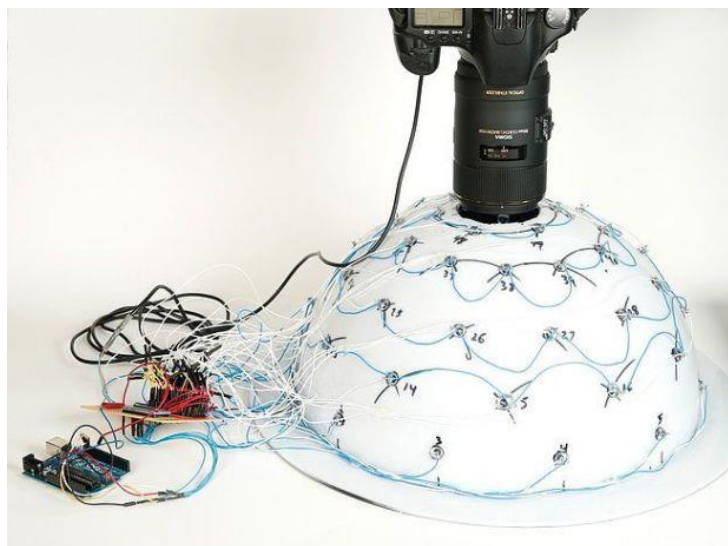
**Joonis 2.2** Siseruumides kasutatav statsionaarne *RTI* pildistamise kuppel [10].

Suurema kupli puhul on tarvis ka võimsamaid valgusallikaid. Seetõttu on selliste kuplite kaasavõtmine väljakaevamistele liiga tülikas ja ebaotstarbekas.

Väiksemate objektide puhul on levinud lahenduseks sisseehitatud valgustuselementidega plastikust kuplid. Kupli ülemisse ossa on tehtud objektiivi tarvis ava. Mõned selliste kuplite lahendused on saadaval internetis. [5] [11]

Esimese näidise autor on Ted Kinsman, kelle valmistatud seade on näha joonisel 2.3. Selle *RTI* seadme juhtimiseks on kasutuses ATmega *MCU-l* põhinev arendusplaat ja Adafruit 16x8 *LED* maatriks koos juhtahelaga. Valgustamiseks on kasutusel suured, 10 mm diameetriga elemendid, mille voolutarve on 0,08 A ja võimsus 0,4 W. [12]





**Joonis 2.3.** Arduino UNO arendusplaadi baasil valmistatud *RTI* seade. [12]



**Joonis 2.4.** Suure 3 W võimsusega *LED*-e kasutav *RTI* seade. [13]

Joonisel 2.4. on näha autor Leszek Pawlowicz *RTI* projekti seade. Pawlowicz on oma tööd väga täpselt dokumenteerinud ning seeläbi pakub huvilistele võimaluse seade ise ehitada [13]. Selles projektis kasutatakse juhtimiseks samuti Atmega arendusplaati, kuid lisaks on loodud võimekus kasutada võimsamaid *LED* elemente.

## 2.2 Sihtgrupi nõuded

Sihtgrupi nõuete selgitamiseks korraldati koosolek arheoloogia spetsialistidega. Järgnevalt on välja toodud olulised fragmendid nõupidamise arutelust:

1. Projekti raames arendatav seade on mõeldud väikeste objektide kohapealseks kiireks pildistamiseks. Seadmega peab olema võimalik pildistada objekte, mille suurus on kuni 10 cm. Kõige olulisemaks tingimuseks arheoloogidele on arendatava seadme puhul võimalus võtta see kaasa väljakaevamisobjektile. Sellest tulenevalt peab seade olema suhteliselt väike, koosnema vähestest osadest ning olema kerge. Samuti peab seadme toiteallikas olema kaasaskantav. Pildistades seadmega objekte siseruumides on oluline, et seade oleks lülitatav ka elektrivõrku.
2. Oluliseks tingimuseks on seadme lihtsus. See tähendab, et seadet on võimalik kasutada üksi, ilma kõrvalise abita. Operaatori põhiliseks tööks *RTI* pildi tegemiseks arendatava seadmega peab olema pildistatavate objektide ettevalmistamine ning seadmesse asetamine. Digitaalse kaamera käsitlemine piirdub ideaalsel juhul selle kinnitamisega kupli külge, vajalike kaablite ühendamise ja kaamera õigesse režiimi seadmisega. See tähendab, et seadme kasutaja nõutavad oskused fotograafia vallas võivad olla ka asjaarmastaja tasemel, ilma et tehtava *RTI* pildi kvaliteet langeks.
3. Kuna väljakaevamised toimuvad peaaegu alati välistes tingimustes, muutub oluliseks faktoriks seadme töötamisel ka keskkond. Suurimaks ohuks seadmele on veekahjustused. See tekitab küsimuse, kas ja kui veekindel seade olema peab. Üldiselt on vihmaadu või üleliigne niiskus takistuseks ka muististe väljakaevamisel. Ilmastikuolude ebasobivaks muutumisel katkestatakse töö ning oodatakse paremate töötingimuste taastumist. Samuti pole ka tavalised peegelkaamerad mõeldud kasutamiseks otsese saju tingimustes. See tähendab, et ka *RTI* seade ei pea olema veekindel. Positiivne oleks siiski, et seade omaks lühiajalist kaitset niiskuse vastu. Näiteks peaks ootamatult saabuva vihma korral olema võimalik seade enne hävinemist niiskuse eest varju tõsta.

4. Kasutamise puhul on turvalisuse nõuetest oluline, et seadme kasutajal ei tekiks võimalust puudutada pingestatud osi. Selle tagamiseks ei tohi seadmest välja ulatuda pingestatud isoleerimata juhtmeid. Seadmel ei tohi olla avasid, kuhu mahuks sõrm või muu sarnase suurusega objekt, mille läbimõõt on suurem kui 2,5 mm.

Kokkuvõtvalt peab sihtgrupi jaoks seade olema:

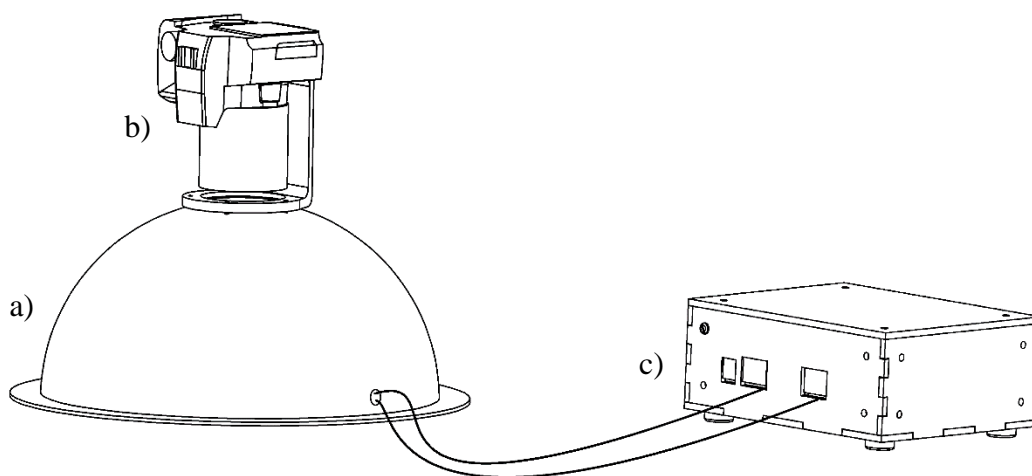
1. Portatiivne;
2. Väike;
3. Kerge;
4. Turvaline
5. Võimalik kasutada nii patareide toitel kui ka vooluvõrku ühendatuna;
6. Lihtne kasutada;
7. Võimalik kasutada üksi;
8. Seadme kasutamisega peab hakkama saama ka diletantlik kaameraoperaator;
9. Võimalusel pritsmekindel;
10. Võimalikult soodne toota.

Eelnimetatud nõuded on eeltingimuseks lähteülesande püstitamisel.

### 3. LÄHTEÜLESANDE PÜSTITAMINE

#### 3.1 Seadme ülesehitus

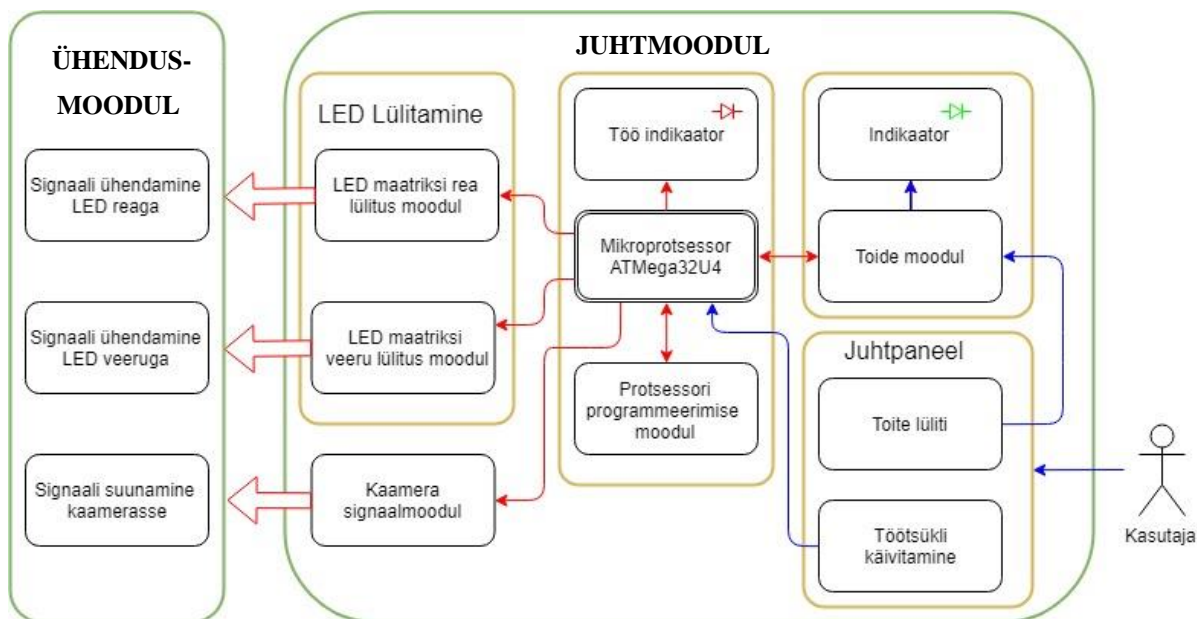
*RTI* seadme põhilisteks osadeks on kuppel, kaamera ja selle kinnitus ning juhtmoodul. Fotografeerimiseks kinnitatakse kupli külge kaamera mis fikseeritakse uuritava pinnaga risti. Seadme eskiis on joonisel 3.1.



**Joonis 3.1.** Seadme põhiosad: a) kuppel, b) kaamera ja selle kinnitus ning c) juhtmoodul.

*RTI* seadme kuppel ja juhtmoodul on eraldiseisvad üksused. Juhtmooduli eesmärgiks on kogu seadme funktsionaalsete protsesside läbiviimine. Samuti asub juhtmooduli küljes ka kasutajaliides.

Kuplis asuvad valguselemendid, mida juhib juhtmoodul. Selleks, et seadmete vahel tagada side, on vajalik arendada ühendusmoodul, mis võtaks juhtmooduli signaali vastu ning toimetaks selle valguselementidesse ja kaamerasse. Seadmete omavaheline sidestatus on visualiseeritud joonisel 3.2.



**Joonis 3.2** Seadme põhiosade arhitektuur.

Joonisel 3.2 on visualiseeritud seadme juhtmooduli ja ühendusmooduli ehitus ning nende omavaheline suhtlus.

### 3.2 Funktsionaalsed nõuded

Selle alapealkirja all kirjeldatakse parameetreid, mis on vajalikud, et tagada seadme funktsionaalsus. Nõuded on välja toodud kogu seadmele ja eraldi alammodulitele. Igal alammodulil on roll, mis toetab kogu süsteemi toimimist.

Kogu seade:

1. Muudab *RTI* pildistamise protsessi automaatseks;
2. *RTI* seadmel on 36 valguselementi;
3. Maksimaalne pildistamise säriaeg on 200 ms;
4. Seadmega on võimalik pildistada kuni 0,1 m diameetri sisse mahtuvaid objekte;
5. Peab ühilduma Canoni peegelkaameratega, millel on distantsjuhtimisterminal;
6. Töötab aku toitel või vajadusel adapteriga vooluvõrku ühendatuna;
7. Töötab 12 V toiteallikaga ning maksimaalne voolutarve on 1 A.

Juhtmoodul:

1. Saadab ühendusmoodulisse pildistamis- ja fokuseerimiskorraldusi;
2. Lülitab valgusallikate töörežiimi;
3. Võimaldab kasutajal valgusallikate intensiivsust muuta;
4. Annab tagasisidet toitemooduli ja töötsükli oleku kohta rohelise ja punase indikaatori abil.

Ühendusmoodul:

1. Ühendab juhtmooduli kupliga kasutades RJ45 pistiku standardit;
2. Ühendab juhtmooduli kaameraga kasutades 2,5 mm pulkpistikut.

### **3.3 Konstruksioonilised nõuded**

Konstruksiooninõuete all on välja toodud seadme gabariidid, funktsionaalsetest nõuetest tingitud mõjutused seadme ehitusele ja turvalisuse nõuded.

Juhtmoodul:

1. Korpuse pikkus on 130 mm, laius 110 mm ja kõrgus 50 mm;
2. Korpuse kaitseklass on IP30, see tähendab juhtmoodul on kaitstud objektide eest, mis on suuremad kui 2,5 mm. Vee toime eest pole seade kaitstud.
3. Juhtmooduli ja kupli vaheline maksimaalne kaugus on 2 m.

Kuppel:

1. Väline diameeter on 330 mm (13 tolli);
2. Paksus on 3 mm;
3. Alumisel serval on 25 mm laiune äärik;
4. Kinnitub ääriku abil alusele;
5. Kupli ülaosas on 7 cm suurune ava, läbi mille saab kaameraga objekti pildistada.

Ühendusmoodul:

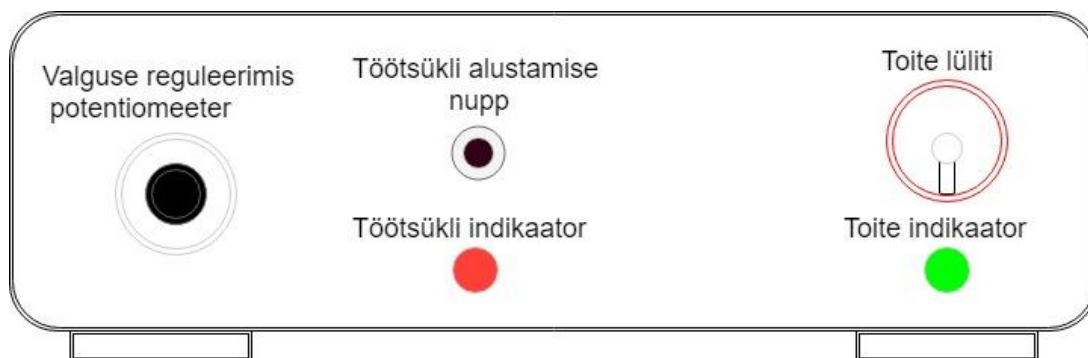
1. Paikneb kupli sees;
2. Kupli seinas on RJ45 pistikute avad.

Kaamera kinnitus:

1. Fikseerib kaamera uuritava objektiga risti;
2. Kinnitab kaamera standardse Canon'i kaamerakinnituskrugi abil kupli külge;
3. Reguleerimisvahemik 3 cm horisontaalsihis ja 8 cm vertikaalsihis.
4. Kaamera kinnituse maksimaalsed gabariidid:
  - 1) vertikaalne: kinnituse põhjast kuni kinnituskruvi tsentrini 130 mm;
  - 2) horisontaalne: objektiivi ava tsentrist kuni vastasküljeni 70 mm.

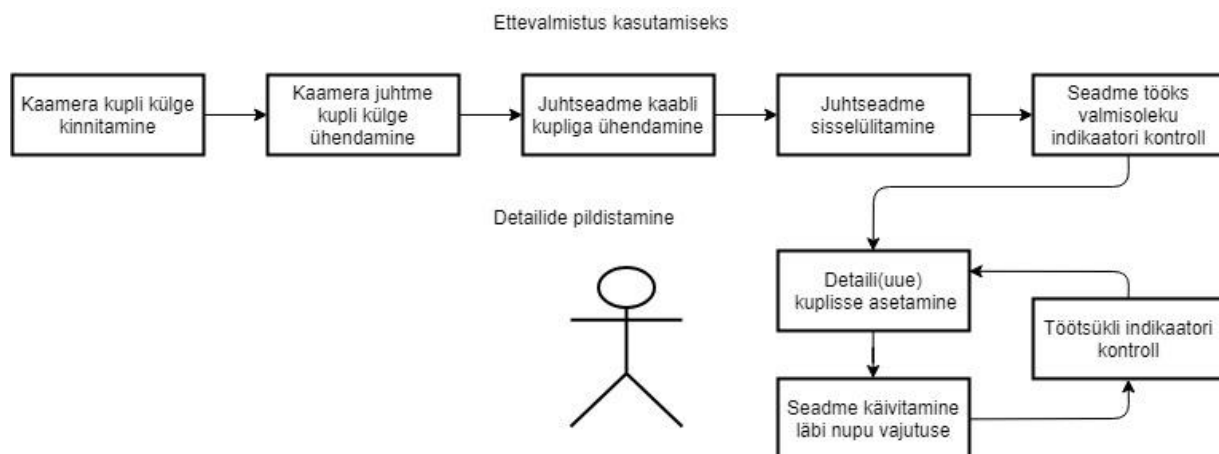
### 3.4 Kasutajaliides

Sihtgrupi poolt määrati, et seadme käsitlemise puhul on kõige olulisem lihtsus ja töökindlus. Seda nõuet silmas pidades peab operaator edukaks *RTI* seadme kasutamiseks minimaalselt tegelema *RTI* seadme manipuleerimisega. *RTI* seadme kasutajaliidese eskiis lähtuvalt kasutaja kogemusest on esitatud joonisel 3.3. Kavandilt on näha kõik *RTI* juhtpaneeli käsitlemiseks vajalikud indikaatorid, nupud, lülitid ja liugurid.



Joonis 3.3. Kasutajaliidese eskiis.

Seadme kasutamine jaguneb kaheks osaks: töökorda seadistamine ja objektide pildistamine. Ettevalmistamise ja kasutamise skeem on visualiseeritud joonisel 3.4.



**Joonis 3.4.** RTI seadme kasutamise skeem.

Töö käigus peab operaator asetama uuritava objekti kuplisse, kupli sulgema ning vajutama töötsükli käivitamisnuppu. Valgustugevus tuleb kasutajal sobivaks reguleerida ainult töösessiooni esimesel korral. Pärast tööprotsessi lõpetamist peab kasutaja ootama ära töötsükli indikaatori kustumise ning seejärel muutma toitelüliti asendit.

Siinkohal on oluline ka ära märkida, et kuni 50 V pingega alalisvoolu peetakse pingeabaks vooluks. See on kasutajale ohutu. Käesoleva projekti seade toimib oluliselt madalamal pingel. Seetõttu seade ei kahjusta kasutaja tervist ka isoleerimata osadega kontakti sattudes.



## 4. SEADME PROJEKTEERIMINE

### 4.1 Elektroonika

#### 4.1.1 Juhtmooduli ja kupli vaheline kommunikatsioon

Juhtmooduli ja kuplis asuva ühendusmooduli vaheline suhtlus toimub standardpistiku RJ45 toel. RJ45 konnektorile vastavad kaabli standardid on *Cat5*, *Cat6* ja *Cat7*. Selle töö raames sobivad kõik kolm standardit, kuid arvestades *Cat5* laia levikut ja soodsat hinda on kõige mõistlikum kasutada just seda. *Cat5* kaabel sisaldab endas nelja keerdpaari, mis tähendab, et omavahel on võimalik ühendada kaheksa sisendit ja väljundit. Seadme parameetrites on määratud, et maksimaalne juhtmooduli ja kupli vaheline kaugus on 2 m. Juhtme takistus meetri kohta on mõistlik võtta kaablitootjate kataloogist. *AWG24 Cat5* kaabli ühe juhtme takistus ühe meetri kohta on  $\sim 0,188 \Omega \cdot \text{m}^{-1}$ . Takistuse suurus küll oleneb konkreetsest tootest, kuid selle levinud suuruse järgi tehtud arvutused annavad järgu, millise pingekaoga peab arvestama. Kogu 2 m pikkuse kaabli juhtme takistus on  $0,376 \Omega$ .

Pingekao arvutamiseks kasutatakse Ohmi seadust:

$$U_{\text{kadu}} = IR, \quad (4.1)$$

kus  $I$  - voolutugevus A;

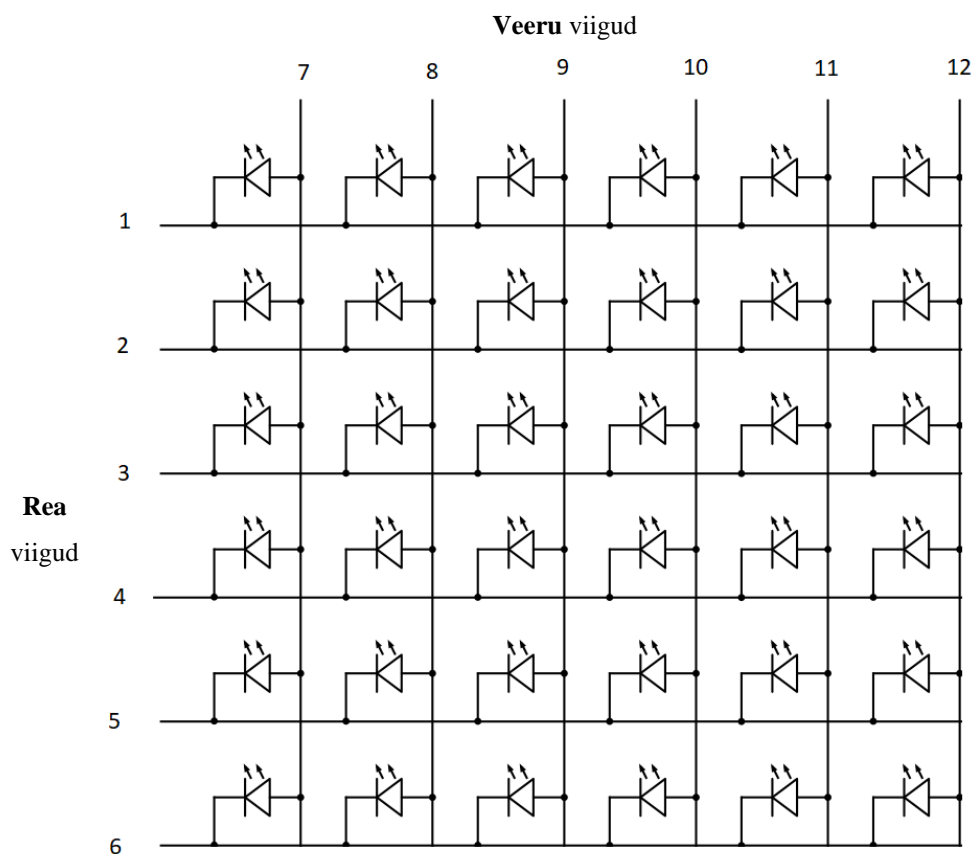
$U_{\text{kadu}}$  - pinge V;

$R$  – kogu juhtme takistus  $\Omega$ .

Valemi 4.1 järgi on pingekadu  $U_{\text{kadu}}$  seadme maksimaalse voolutugevuse 1 A korral  $0,376 \text{ V}$ . See tähendab, et 3 V toitepinge puhul on pingekadu  $\sim 12,54\%$  ning kupli klemmidel on pinge seega  $2,624 \text{ V}$ . Selline pingekadu on töö eesmärke arvestades rahuldav.

### 4.1.2 LED juhtimise süsteem

*RTI* kuplisse on ette nähtud 36 valguselementi. Sellise valgusti juhtimiseks peab kasutama maatriksit, vastasel juhul on iga valgusti juhtimiseks tarvis eraldi mikroprotsessori universaalset väljundviiku (*GPIO*). Maatriksi abil on aga võimalik kahe signaaliga juhtimisel kontrollida süsteemis iga individuaalset elementi. Joonis 4.1. näitlikustab, kuidas on valgusallikad ühendatud maatriksiks. Selline maatriks kasutab binaarset olekusüsteemi.



**Joonis 4.1.** Valguselementide juhtmaatriksi skeem. [14]

Maatriksi lahendusi on olemas erinevaid. Kõige tüüpilisem maatriks on näha joonisel 4.1, mille puhul on võimalik juhtida 36 elementi 12 *GPIO* abil [15]. Laialt levinud on mikroprotsessorid, mille puhul saab 12 viiku rakendada maatriksi juhtimiseks, samas jättes piisavalt viikusi vabaks ka ülejäänud võimekuse tagamiseks. Sellele kriteeriumile vastab töös kasutatav protsessor ATmega32U4.

### 4.1.3 Valguselemendi valik

On olemas väga palju erinevaid valgusallikate tüüpe, nende võrdlus on näha tabelis 4.1. Käesoleva töö puhul on oluline, et elemendi valgusvoo tugevus oleks ühe võimsusühiku kohta võimalikult suur. Teine väga oluline parameeter on valguselemendi gabariidid. Võttes arvesse tabeli 4.1. andmeid on valgusdiod (LED) sellise projekti puhul parim valik. Lisaks kõrgele lm / W suhtele valmistatakse LED-e ka väga erinevate mõõtudega, mida kirjeldab standard SMD. [16]

**Tabel 4.1.** Valgusallikate võrdlus. [17]

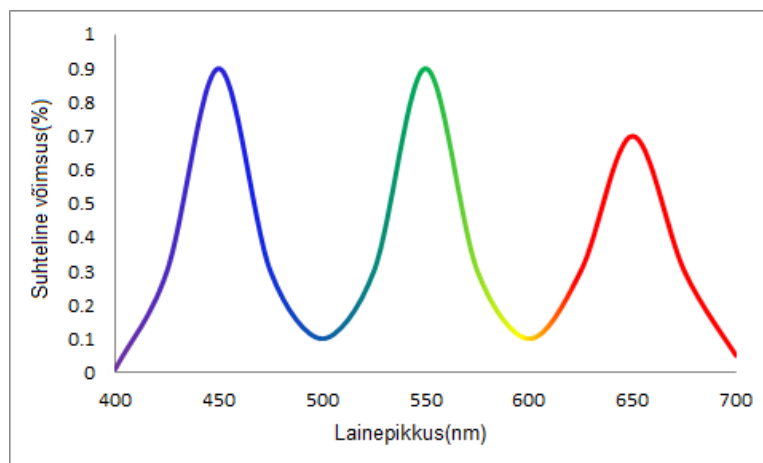
Valgusallika tüüp	Tegelik efektiivsus, lm/W	Ressurss, tunnid
Hõõglamp	6 - 10	1000
Halogeen	12 - 20	2000
Luminofoor	35 - 50	10000
Kompakt-luminofoor	< 40	6000 - 15000
Metallhalogeniid	55 - 70	15000
Valgusdiod	90 - 100	> 50000
Kõrgrõhu-naatrium	< 50	15000

Inimene tajub nähtava valgusena elektromagnetkiirgust lainepikkusel 380 kuni 780 nm. Selle spektri lainepikkusi tõlgendab inimene värvadena. Valge valgus moodustub kogu nähtava valguse spektrist. Valgusdiodi kiirgus on aga kitsa spektriga ning seetõttu kasutatakse valge valguse saamiseks erinevaid tehnoloogilisi võtteid.

Valge valguse tekitamiseks elektroluminestsentsi abil kasutatakse:

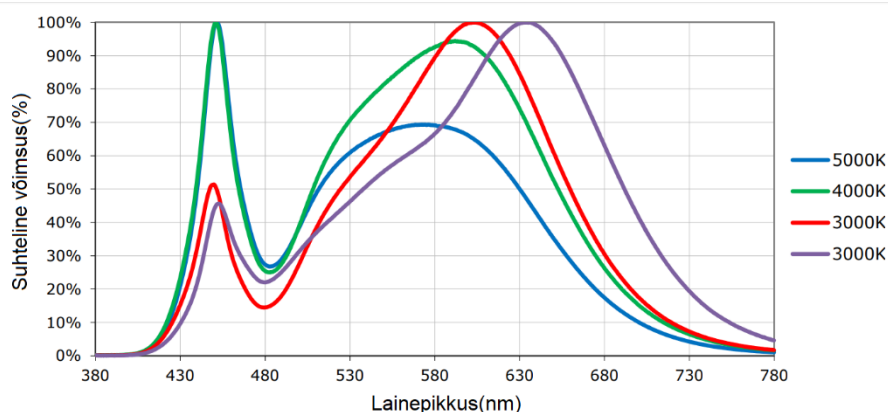
1. Kolme värvimudeli RGB põhivärvi koosmõju;
2. *Quantum-dot* filtreid;
3. Orgaanilisi valgusdioode (*OLED*);
4. Fosfori kihiga LED-e.

Kolme *RGB* põhivärvi koosmõjul töötava *LED*-i valgusspekter on näha joonisel 4.2. Valgusspektrit uurides võib täheldada, et see on ebaühtlane. Lainepikkusel 450 nm, 550 nm ja 650 nm on suhteline võimsus oluliselt, kuni üheksa korda kõrgem kui lainepikkustel 500 nm ja 600 nm. See vähendab *RTI* seadmega uurimisel objektilt peegelduva valguse informatsiooni hulka. Lisaks on moonutatud ka objekti värvid, mille tõttu võib hilisem materjali või muu iseloomuliku tunnuse hindamine olla häiritud.



**Joonis 4.2.** RGB LED lainepikkused nähtava valguse spektris. [18]

Kõige enam kasutatakse valge valguse kiirgamiseks fosfori kihiga töötavaid *LED*-e. Nende valgusspekter on lai, näha joonisel 4.3, nad on võrdlemisi soodsad ja efektiivsed.

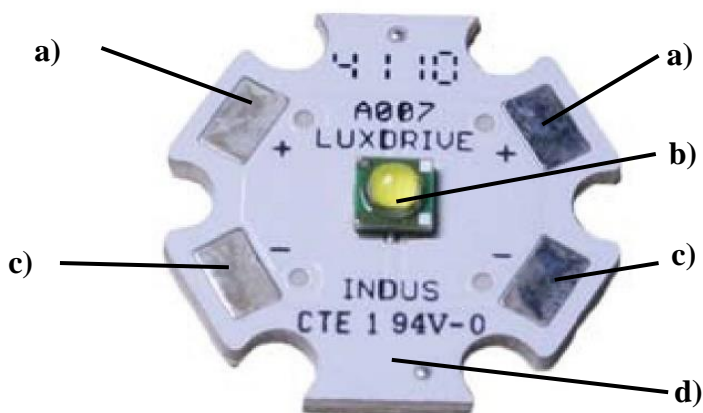


**Joonis 4.3.** Fosfori elemendiga töötavate erineva värvustemperatuuriga Luxdrive *LED*-ide valgusspektrid. [19]

Joonisel 4.3. on näha, et valgusspekter ei ole täiesti ühtlane. Lainepikkusel 480 nm on kõigi värvustemperatuuridega *LED*-ide puhul suhteline võimsus madal. Suhtelise võimsuse intensiivsemad vahemikud on 440 – 470 nm ja 500 – 650 nm, varieerudes erinevate värvustemperatuuride puhul. Võrreldes joonise 4.2 spektriga on fosfor kihiga töötav *LED* siiski palju sobivam selle projekti elemendiks.

Ted Kinsmani artiklis *An Easy To Build Reflectance Transformation Imaging (RTI) System* on kirjeldatud tema valmistatud *RTI* süsteemi. *RTI* seadmes kasutatakse 10 mm diameetriga *LED*-e, mille voolutarve on pingel 5 V, 80 mA [11]. Artiklis on välja toodud, et hea kvaliteediga foto saamiseks valgustundlikkusel *ISO* 100 tuleb kasutada säriaega 5 sekundit. See tähendab, et terve tsükli ehk 36 pildi tegemiseks kulub 180 sekundit. Artiklis on räägitud tulemustest 304,8 mm (12 tolli) kupli korral. Käesolevas projektis kasutatava 330 mm kupli puhul peab säriaeg ilmselt olema natukene pikem. Teine variant on hoopis kasutada kõrgema võimsusega *LED*-e.

Eelnevat arvesse võttes osutused sobivateks valgusallikateks Luxdrive A007-GW830-Q4 Indus Star moodulid. Valitud moodul kasutab *LED* elemendina Cree Xlamp XP-E *LED*-i, mille valguse spekter on esitatud joonisel 4.3. Nende kõrge võimsusega *LED*-ide maksimaalseks valgusvoo tugevuseks võimsusel 3 W on 700 lm. *LED* elemendiga moodul on kujutatud joonisel 4.4.



**Joonis 4.4.** Luxdrive A007/A008 Indus Star *LED* valgusmoodul. Moodul koosneb:

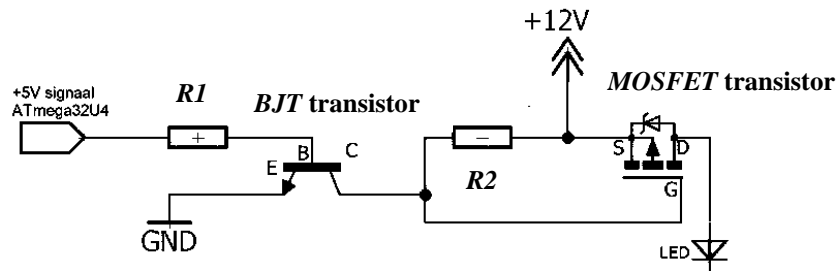
a) + jootepadi, b) *LED* element , c) - jootepadi, d) radiaator. [20]

#### 4.1.4 LED lülitamise moodul

Cree Xlamp XP-E valge tooniga *LED* töötab voolutugevusel 1 A. Ilma protsessorit rikkumata pole selle viikudest võimalik sellist voolutugevust läbi lasta. See tekitab vajaduse mooduli järele, mis võimaldab mikroprotsessoril juhtida *LED* valgusteid samas tagades *LED* valguselemendile piisava võimsusega toite.

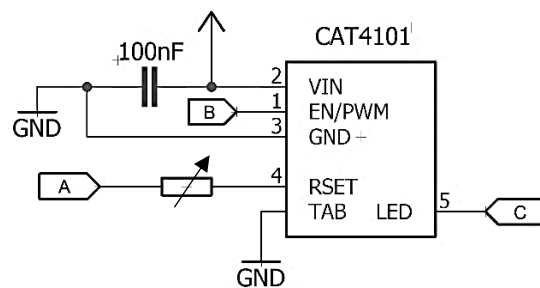
Selles projektis on maksimaalseks kasutatavaks voolutugevuseks 1 A. Seetõttu sobib *LED*-e lülitama transistor, mille spetsifikatsioon lubab 1 A suurust voolutugevust. P-tüüpi *MOSFET* transistorid on mõeldud töötama kõrge voolutugevuse korral. Selleks, et sellist transistori tüürida, läheb tarvis ka suuremat pinget kui mikrokontrolleri väljundviikudel olev. Kasutatava mikroprotsessori ATmega32U4 maksimaalne väljundpinge on 5 V. Moodulis kasutatava IRF9540 P-tüüpi transistori töörežiimi täielikuks ümberlülitamiseks nõutav lätte ja paisu pinge potentsiaalide diferents (*VGS*) peab olema vähemalt 10 V. Siinkohal on oluline välja tuua, et P-tüüpi *MOSFET* on avatud juhul kui *VGS* on 0 V. Selleks, et transistor kindlasti täielikult lülituks on soovitatav arvestada *VGS* varuga. Pooliku avanemise korral väheneb ülekuumenemise tõttu transistori eluiga. Seda arvesse võttes toimub lülitus käesoleval juhul 12 V *VGS* korral.

Nagu eelmises lõigus mainitud, pole võimalik ATmega32U4 protsessoriga vajalikku lülitust otse teha. Selleks kasutatakse skeemis lisatransistori, mida on võimalik mikroprotsessoriga juhtida. Sobivaks elemendiks valiti *BJT* (bipolaar) *NPN* transistor 2N3904, mille lülitamiseks saab piisava voolutugevuse otse *MCU* viigust. Kui mikroprotsessori väljund on kõrgseisus, tekib *NPN* transistori kollektorit ja emitterit läbiv vooluring. See avab omakorda vooluahela, mis ühendab IRF9540 pais miinusklemmiga. Järgnevalt tekib P-tüüpi transistori paisu ja lätte vahele 12 V suurune potentsiaalide erinevus. Valgusallika vooluring on nüüd avatud. Kirjeldatud mooduli skeem on joonisel 4.5. Selle skeemi ülesandeks on *LED* maatriksi veerusignaalide juhtimine.



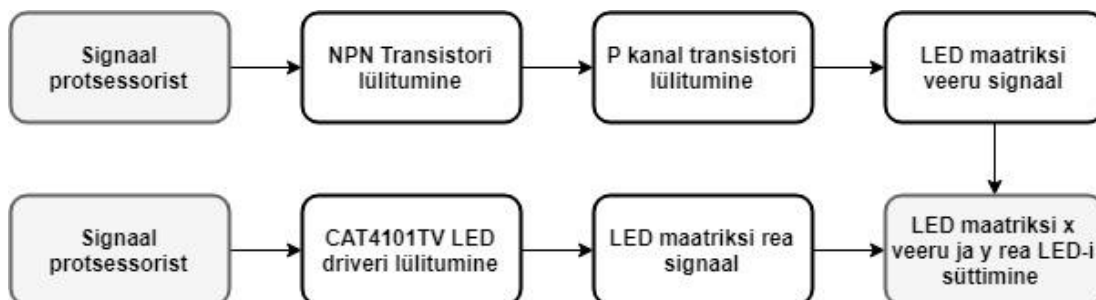
**Joonis 4.5.** LED veeru lülitamise skeem. MOSFET transistori tähiste tähendused: S – läte, G – värv, D – pais. BJT transistori tähiste tähendused: E – emitter, B – baas, C – kollektor.

CAT4101TV ülesandeks moodulis on maatriksi ridade kontrollimine. Lisaks sellele, et komponent ühendab ja katkestab LED maatriksi ridasid maandusest, omab see LED juhtmoodul ka võimekust reguleerida ahelat läbivat voolutugevust vahemikus 150 mA kuni 1000 mA. LED maatriksi rea lülitamise skeem on joonisel 4.6.



**Joonis 4.6.** Joonisel on A) 5K potentsiomeeter, B) juhtsignaal, C) LED element.

LED maatriksi lülitamise vooskeem on kujutatud joonisel 4.6.



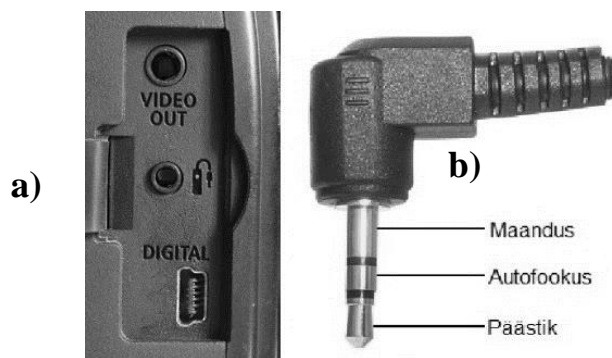
**Joonis 4.6.** LED maatriksi lülitatismooduli vooskeem.

Kokkuvõtlikult koosneb *LED* lülitamise moodul kolmest põhikomponendist:

1. 2N3904 *BJT NPN*-tüüpi transistorist;
2. IRF9540 P-tüüpi *MOSFET* transistor *LED* maatriksi veeru lülitamiseks;
3. CAT4101TV-T75 *LED* juhtmoodul maatriksi rea lülitamiseks ja voolutugevuse reguleerimiseks.

#### 4.1.5 Kaamera signaalmoodul

Selles töös ehitatakse *RTI* seade, mis oleks ühilduv Canoni kaameratega, millele on sisse ehitatud distantjuhtimisterminal. Tavalises kasutuses ühendatakse terminaliga pult, kuid sarnase põhimõttega on võimalik juhtida kaamerat ka kasutades mikroprotsessorit. Soodsamas hinnaklassis Canoni peegelkaamerate terminal, mille distantjuhtimispäästiku sisend on 2,5 mm pulkpistik, on joonisel 4.7.



**Joonis 4.7.** Canon kaamera distantjuhtimise ühendused: a) distantjuhtimisterminal, b) distantjuhtimisterminaliga ühilduv 2,5mm pulkpistmik. [21]

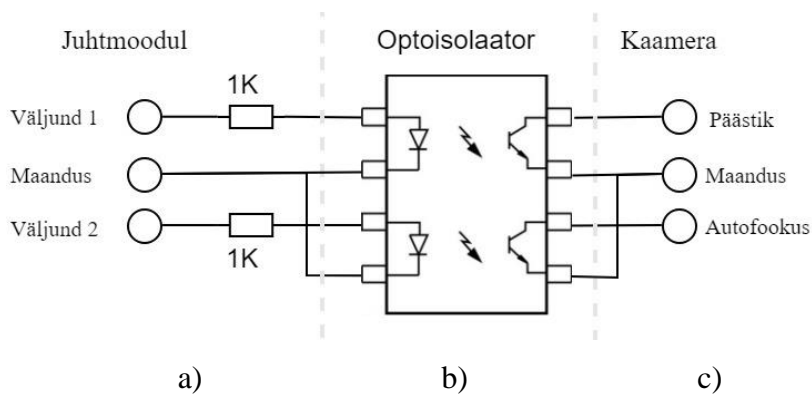
Keskmise hinnaklassi ja kallimate (näiteks: *6D*, *EOS-1D C*) Canon-i peegelkaamerate terminali standard on *N3*, mis on välja toodud joonisel 4.7. Põhimõte on mõlematel sisenditel identne; kasutades vaheadapterit, mis ühendab 2,5 mm pulkpistmiku *N3* pistikuga, on selle seadmega võimalik kasutada mõlemat tüüpi distantsterminaliga kaameraid. [22]





**Joonis 4.8.** Canon kaamera distantjuhtimise ühendused: a) N3 distantjuhtimisterminal, b) N3 pistmik. [22]

Kaamera distantjuhtimisterminali elektroonika kaitsmiseks tuleb ehitada eraldi skeem, nähtav joonisel 4.9.



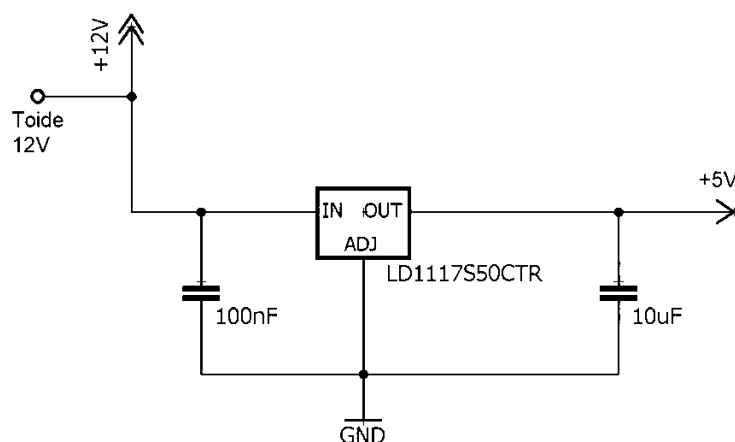
**Joonis 4.9.** Kaamera kaitsemoodul. Skeem on mõtteliselt jaotatud kolmeks osaks: a) *MCU* väljundid, b) optiline signaalide eraldamine, c) kaamera sisendid. [23]

Juhul kui terminali ja mikroprotsessori vahel tekib vooluring, on oht vigastada kaamera elektroonikat. Seetõttu on vajalik skeem, mis kaitseks kaamerat, kuid võimaldaks kaamerale pildistamissignaali edastada. Selleks on kõige turvalisem kasutada optoisolaatorit. Element kasutab skeemide vahelise elektrilise signaali edastamiseks valgust, takistades seeläbi mikroprotsessorist tuleval voolul kahjustamast kaamera distantslülitusterminali. Optoisolaatori skeemi ühel pool asub *LED* valgusallikas ja teisel pool fototransistor. Selleks, et juhtida nii

kaamerakatikut kui ka autofookust tuleb kasutada kahte mikroprotsessori viiku ja kahe kanaliga komponenti. Seadmele sobiv komponent on *VOD211T*.

#### 4.1.6 Toitemoodul

Mikroprotsessori ja skeemi toitmiseks on vajalik 5 V pinget. *LED* lülitamise moodulis on transistori *IRF9540* oleku lülitamiseks vajalik 12 V pinget, täpsemalt seletatud peatükis 4.1.4. Toitemoodul peab väljastama kahte erinevat pinget. Kõige lihtsam lahendus on kasutada toiteallikat pingega 12 V ja lisapingeregulaatori abil saada 5 V pingega väljund. Skeemis on kasutatud fikseeritud 5 V pinget väljundiga *LDO* pingeregulaatorit LD1117S50CTR. STMicroelectronics-i regulaatori andmelehel on välja toodud tüüplahenduse skeem, mille järgi on loodud toitemoodul [24]. Projektis kasutatud toitemooduli skeem on joonisel 4.10.



**Joonis 4.10.** LD1117S50CTR pingeregulaatoriga toitemooduli skeem. [24]

Jooniselt on näha fikseeritud väljundiga pingeregulaatori skeem, stabiliseerivad kondensaatorid, toide 12 V ning väljundid 12 V ja 5 V.

Toitemoodulis on kasutatud väga sarnast lahendust andmelehel soovitatud skeemile, kuid lisatud on 12 V väljund. Plaadi disainimisel on oluline, et stabiliseerivad kondensaatorid oleksid asetatud pingeregulaatori vahetusse lähedusse ehk kuni 10 mm kaugusele. [24]

#### 4.1.7 Mikroprotsessori moodul

Seadme juhtmooduli ajuna kasutatakse protsessorit ATmega32U4. See on ettevõtte Atmel madalal võimsusel töötav 8 bitise käsustikuga *RISC*-arhitektuuril baseeruv *AVR* mikrokontroller. Atmeli protsessori kõrgeim võimalik taktsagedus on 16 MHz. Juhtprogrammi mahutamiseks omab kiip 32 kB välmälu. Juhtprogrammi salvestamiseks kontrollerrisse kasutatakse *USB* standardit 2.0. ATmega32-l on 44 sisend/väljund viiku, millest programmeeritavaid on 26. Käesoleva töö keskseks mikroprotsessoriks on valitud ATmega32U4, sest ta on laialt levinud, madala voolutarbega, soodne ning omab piisavat arvu programmeeritavaid viike. [25]

ATmega32U4 töötamiseks vajalikud tingimused:

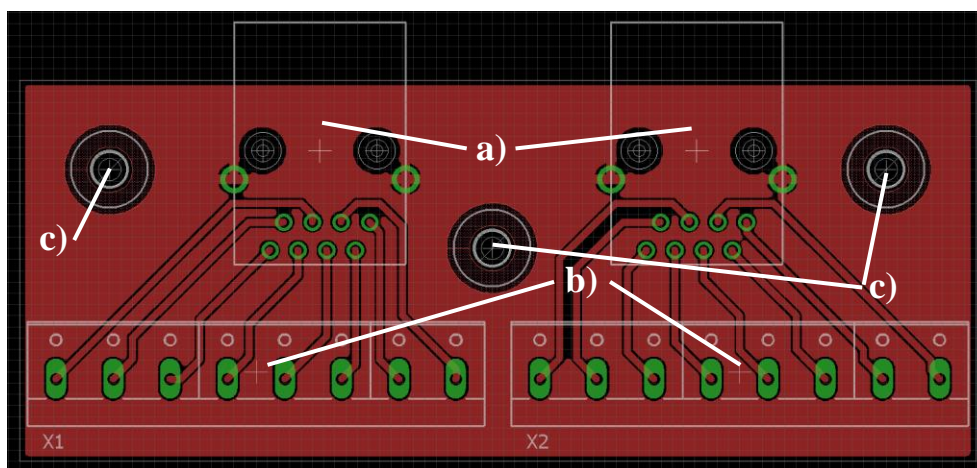
1. 3,3 V või 5 V toide;
2. Protsessori takti reguleerimine kvartsotsillatoriga;
3. Ühenduse loomine protsessori programmeerimiseks *USB* pordiga;
4. Protsessori programmeerimis- ja algseadistus, lülite monteerimine;
5. Toite viikude *VCC*, *VCC2*, *AVCC*, *AVCC2* ja *UVCC* omavaheline ühendamine;
6. Stabiliseerivad kondensaatorid viikudele *VCC*, *VCC2*, *AVCC*, *AVCC2* ja *UVCC* ;
7. Viikude *AREF* ja *UCAP* ühendamine;
8. Maandusviikude omavaheline ühendamine.

#### 4.1.8 Juhtpaneel

Juhtpaneeli eskiis on joonisel 3.3. Juhtpaneelile kinnituvad järgmised elektroonika-komponendid: 1) toitelüliti MCR13-28A-01, 2) voolutugevuse seadistamiseks potentsiomeeter Bourns3310 ja 3) ennistuv avatud kontaktidega (*NO*) surunupplüliti Apem 1213A2. Juhtpaneelile ei ole eraldi indikaatoreid välja toodud, sest trükkplaadil olevad *LED* indikaatorid on nähtavad läbi pleksiklaasist korpuse. Juhtpaneeli komponendid ühendatakse juhtmete abil trükkplaadi kruviterminalidele.

#### 4.1.9 Ühendusmooduli trükkplaadi disain

Joonisel 4.11 on ühendusmooduli trükkplaat, sellel on näha: a) *RJ45* pistikud, b) kaheksa ühendusega kruviterminalid ja c) kinnitusavad.

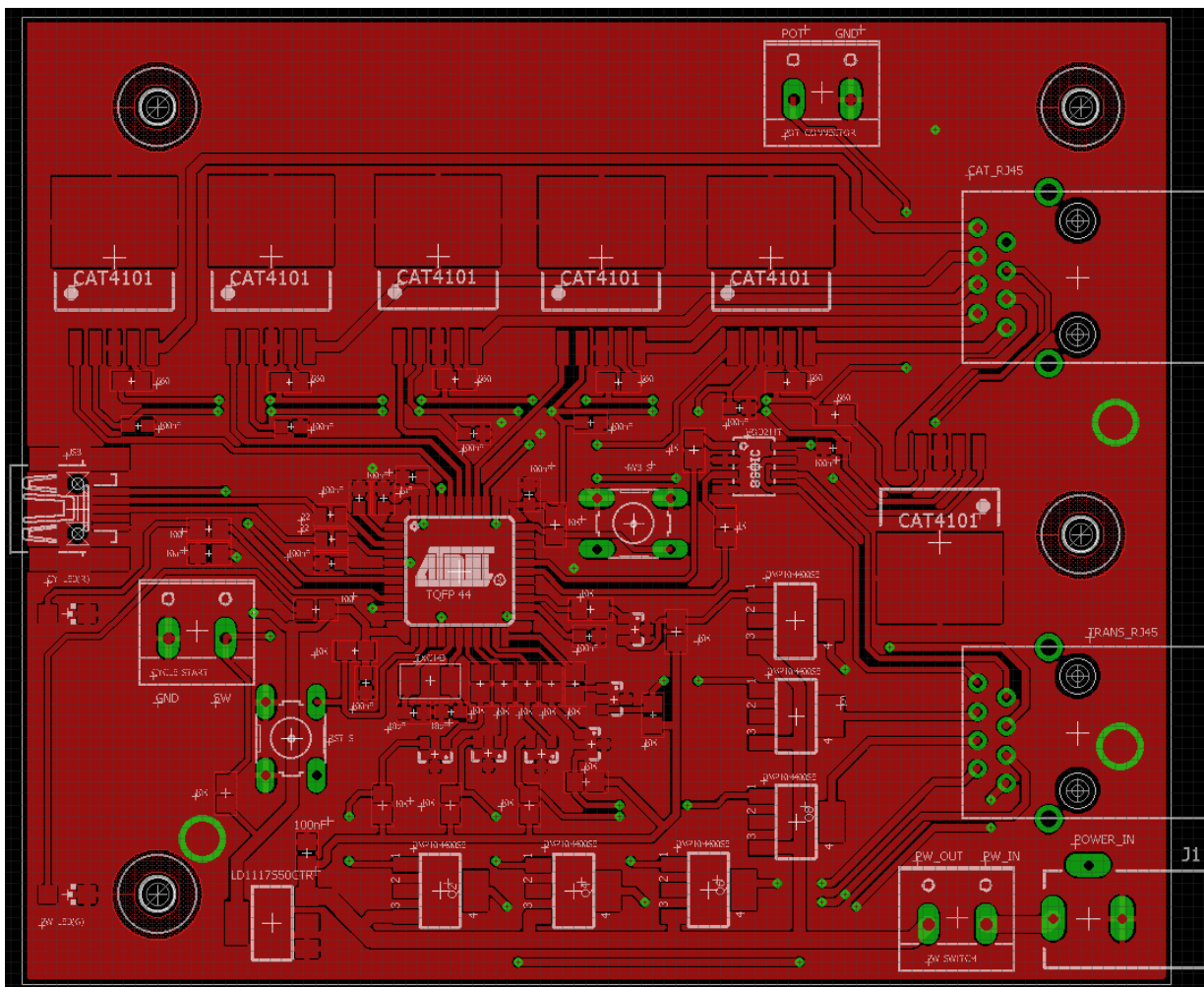


**Joonis 4.11.** Ühendusmooduli trükkplaat

Ühendusmoodul toimib üleminekuna *RJ45* pistmikust kruviterminaliks. Ühendusmooduli kruviterminalide külge kinnituvad kaamera juhtimise ühendused: *GND*, autofookus ja pildistamine. Ülejäänud kruviterminalide külge kinnituvad kuplis asuvad valguselemendid.

#### 4.1.10 Juhtmooduli trükkplaat

Joonisel 4.12. on näha juhtmooduli trükkplaadi kujundus. Trükkplaadi ehk (*PCB*) mõõtmed on 1,57 x 102 x 86 mm. Plaadi kõrgus tuleneb isoleerkihi paksusest 1,5 mm ja mõlemal poolel asuvast vasekihist, mille paksus on 0,035 mm.

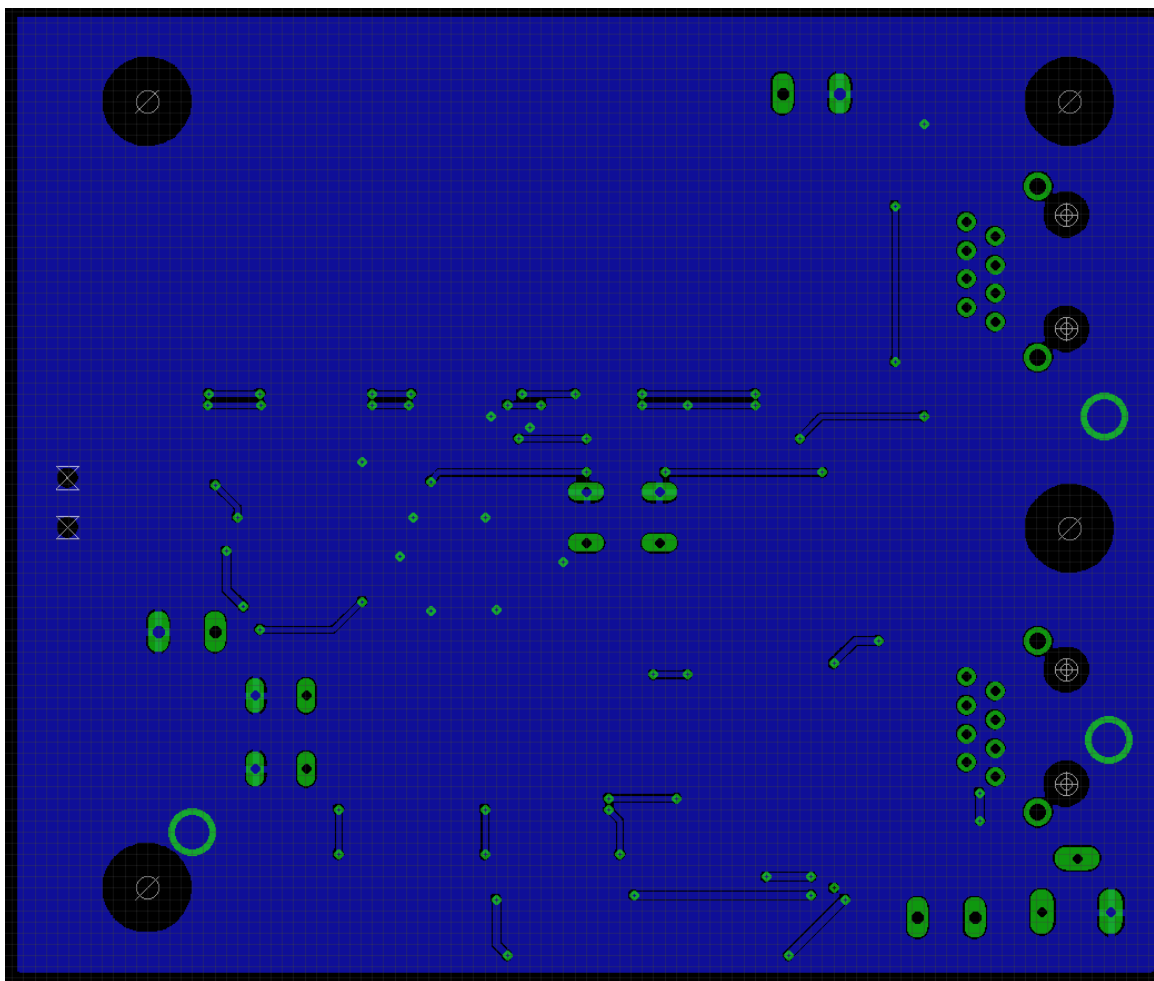


**Joonis 4.12.** Juhtmooduli trükkplaadi pealne kiht.

Selle projekti vajadusi rahuldab kahepoolne trükkplaat. Plaadi mõlemad kihid, nii ülemine kui ka alumine, omavad maandusvälja. Maandusvälja kasutamine muudab *PCB* töökindlamaks, kompaktsemaks ning võimaldab komponentidele paremat soojusvahetust. Pealmisele kihile on asetatud kõik komponendid ning valdav osa neid ühendavatest radadest. Alumine pool on põhiliselt kasutuses maandusväljana. Alumisel kihil asuvad rajad vaid juhul, kui teisiti pole

komponentide vahelisi ühendusi võimalik luua. Alumisel kihil asuvate radade puhul on silmas peetud, et need ei lõikaks maandusvälja suuri isoleeritud alasid.

Radade minimaalseks isolatsiooni paksuseks on määratud 0,2 mm. See on piisav puhver, et ära hoida seadme maksimaalsel võimsusel tekkida võivad parasiitvoolud. Töökindluse mõttes on oluline vältida radadel teravaid nurki, mis suurendavad lekkevoolu. Selleks, et hoida *PCB* mõõtmed võimalikult väikesed, on kasutatud *SMD* komponente.



**Joonis 4.12.** Juhtmooduli trükkplaadi alumine kiht.

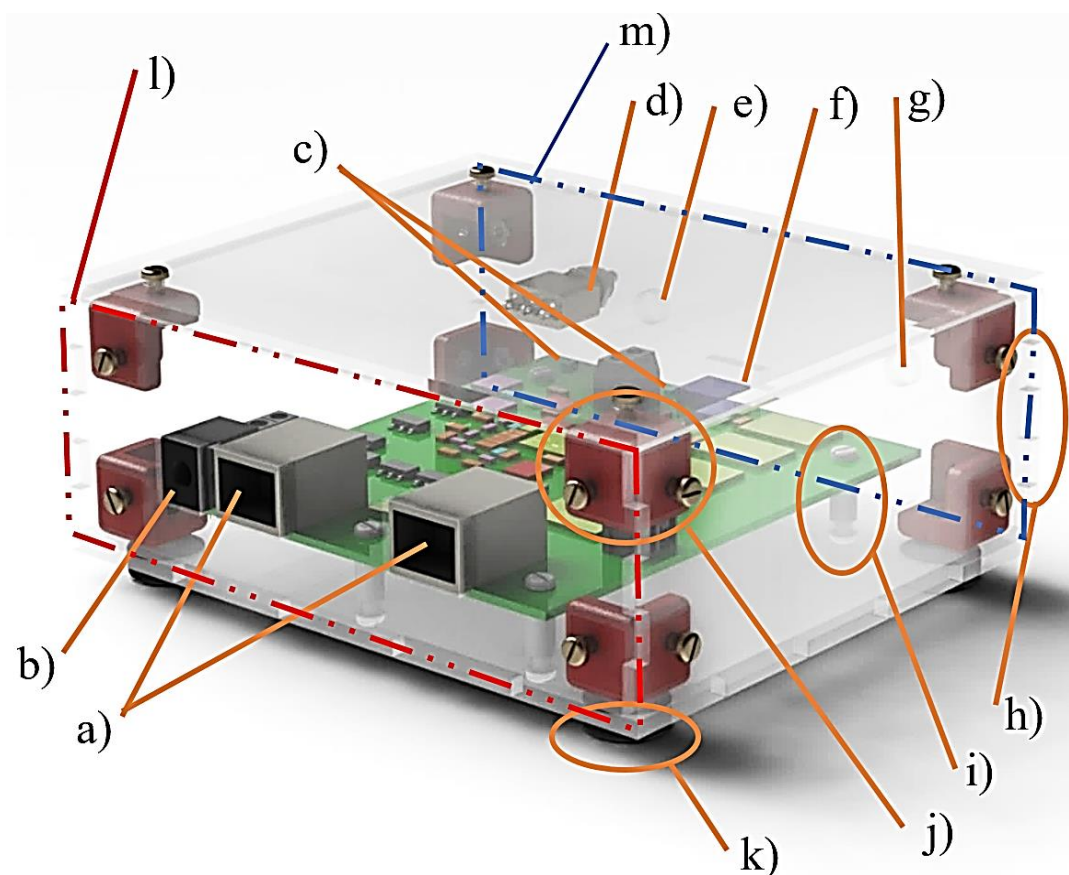
Trükkplaadi alumisel kihil on ühendusradasid vähe ning needki võimalikult lühikesed. Radade puudumine lühendab komponentide maandust ning seeläbi muudab *PCB* töökindlamaks. Alumisel kihil puuduvad joodetud komponendid.

## 4.2 Korpused

### 4.2.1 Juhtmoodul

Korpuse ülesandeks on kaitsta elektroonikat väliste tegurite eest. Projekteeritud korpus peab tagama juhtmoodulile kaitset IP30. See tähendab, et juhtmoodulile ei pääse läbi korpuse ligi juhtmete või teiste objektidega, mis on suuremad kui 2,5 mm. Pritsmete eest ei paku korpus kaitset.

Joonisel 4.12. on näha juhtmooduli korpus, milles on *PCB* mõõtudega 1,57 x 102 x 86 mm.

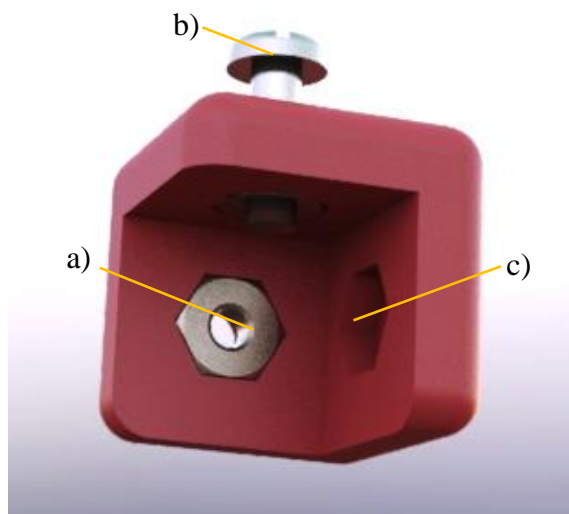


**Joonis 4.14.** Juhtmooduli korpuse osad: a) RJ45 pistikud, b) *DCJ030* toitepistik, c) indikaator *LED*-id, d) toitelüliti ava, e) töötsükli nupu ava, f) *USB* mini-B ava, g) potentsiomeetri ava, h)

corpuse kinnitustapid, i) *PCB* kinnitamise element, j) nurkkinnituselement, k) seadme jalad, l) tagapaneel, m) esipaneel.

*PCB* on kinnitatud corpuse külge nelja 10 mm pikkuse nailonist distantsmutter. Distantsmutter on kinnitatud trükkplaadi ja corpusepõhja vahele M2,5 poltidega. Joonisel 4.14 on punase katkendliku kontuuriga märgitud tagapaneel, kus asuvad RJ45 ja DCJ030 pistikud, sinise katkendjoonega on esile toodud esipaneel ehk juhtliides. Juhtliidesel on avad *d*, *e*, *f*, ja *g*. Juhtliidest kasutades näeb läbi corpuse külje *PCB*-l asuvaid indikaatoreid, joonisel tähis *c*. Kogu corpuse puhul on pistikute ja avade vahele jääv tolerants igas suunas 1 mm.

Selleks, et pistikud oleksid kasutatavad läbi corpuse avade, peab *PCB* asuma corpusest 1 mm kaugusel, sest selliselt on pistikud corpuse välisküljega tasapinnas. Küljed A ja B peavad olema horisontaalses suunas eemaldatavad, sest muidu pole võimalik *PCB*-d corpusesse mahutada. Seetõttu võeti vastu otsus, et kogu corpuse koosneb elementidest. Corpuse on valmistatud 3 mm paksusest polümetüülmetakrülaadist. Küljed on ühendatud tappidega, joonisel 4.14 tähis *h* ja nurkkinnituselementidega joonisel tähis *j* Nurkkinnituselementi koosseis on näha joonisel 4.15.



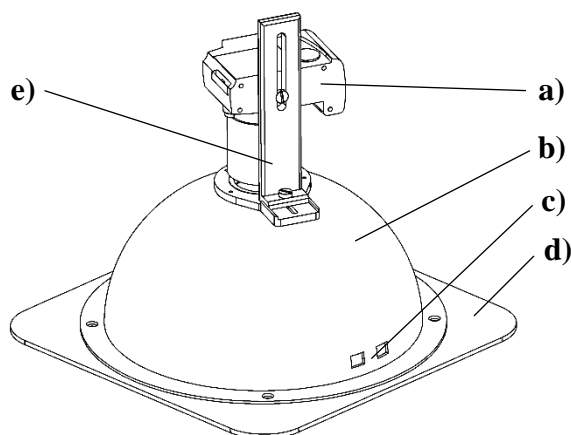
**Joonis 4.15.** Nurkkinnituselement. a) Mutter, b) polt, c) mutriava.

Elementi sisse on tehtud 3 ava, kuhu sisse paigutuvad M2,5 mutrid. Corpuse elementid kinnituvad nurkkinnituselementi külge poltidega.



### 4.2.2 Kuppel

Kupli diameeter on 330 mm. Kupli alumine serv on 25 mm laiuse äärikuga. Kupli seesmisel pool asuvad lambid, mis valgustavad pildistatavat objekti erinevate nurkade alt. Ideaalse olukorra puhul langeb valgus objektile ning peegeldub ilma valgusmüra tekitamata kaamerasse. Sellisel juhul jõuab *RTI* pildile enim kasulikku informatsiooni. Reaalselt pole võimalik saavutada sellist olukorda, kus valgus neelduks pärast esimest põrget täielikult. Lisaks *LED*-idele peegeldub valgus kuplis ka kaamera objektiivi pealt. Valguse peegeldumise vähendamiseks on kuppel ja *LED* moodulite radiaatorid seest värvitud ja musta värvi matiks.



**Joonis 4.16.** Seadme kuppel ja kinnitus

Joonisel 4.16 on näha seadme osad: a) kaamera, b) kuppel, c) ühendusmoodul, d) kupli alus, e) reguleeritav kaamera kinnitus.

Kupli sisse paigutatakse silikoon liimiga valguselemendid. Valgusallikad ühendatakse juhtmete abil ühendusmooduli kruviterminalidega. *LED* maatriksi moodustavad juhtmed, millega *LED*- ühendatakse. Ühendusmooduli tarvis on kupli sisse disainitud spetsiaalne alus, millele see kinnitub. Joonise 4.16 tähis c toob esile ühendusmooduli portide avad.

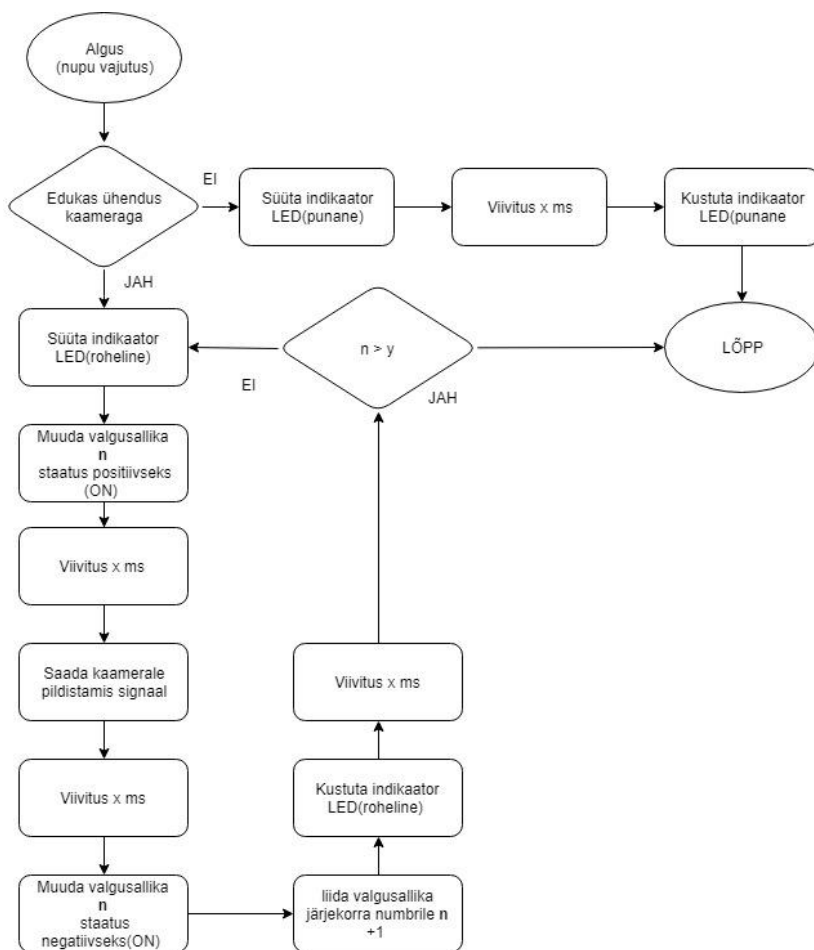
Tähi e näitab joonisel reguleeritavat kaamerakinnitust, mis fikseeritakse kupli külge kasutades M3 standardiga kinnitusvahendeid. Reguleeritav kaamerakinnitus ühildub kõige Canoni

kaameratega, mille kinnitamiseks kasutatakse standardset kinnituskruvi . Kupli äärikul on avad, mille abil on võimalik kinnitada kuppel põhja külge.

### 4.3 Püsivara

Seadme juhtmooduli töötamiseks on vajalik juhtprogramm. Juhtprogramm arendati kasutades tarkvarapaketti *Atmel Studio 7.0 IDE*. Tegemist on spetsiaalse tarkvaraarenduskeskkonnaga, mis toetab C programmeerimiskeeles juhtprogrammide arendamist Atmeli protsessoritele. Programmi laadimiseks mikroprotsessorisse kasutati programmaatorit *Flip 3.4.7*

Programmi tööloogika on näha joonisel 4.17.



**Joonis 4.17.** Juhtmooduli töö algoritm.

## 5. PROTOTÜÜP

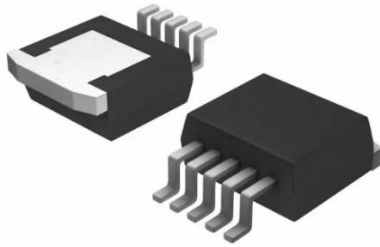
### 5.1 Ehitamine ja testimine

Juhtmooduli prototüübi ehitamiseks telliti trükkplaat firmast Brandner PCB OÜ. Trükkplaadi mõõtudeks oli 1,57 x 85x 90. Trükkplaadile komponentide jootmise järjekord on oluline selleks, et minimeerida võimalikku komponentide kahjustamist.

Esimesena joodeti trükkplaadile toitemoodul ning testiti väljundpingeid 12 V toiteallika korral. Toiteallikana kasutati *YUASA NP7-12* 12 V pliiaikut. Seadme testimisel kasutati mõõtmiseks multimeetrit *UNI-T UT61E*. Mõõtmisel saadi pliiaiku väljundpingeks 12,16 V. Toitemooduli väljundite pinged olid miinusklemmi suhtes: 1) 12,13 V ja, 2) 4,87 V. Need pinged on juhtmooduli töökorda seadmiseks rahuldavad.

Teisena joodeti trükkplaadile *MCU ATmega32U4* tööle seadmiseks vajalikud komponendid. Kuna *Atmega32u4* moodulis asuvad ka väikeste mõõtmetega (*SMD 0603*) komponendid, oli jootmiseks vajalik kasutada mikroskoopi. *Atmega32U4* moodulil testiti esmaselt toiteviikude ja *GND* vahelist pinget, mis andis soovitud tulemusi. Seejärel testiti *MCU* programmeerimise liite toimimist tarkvaralise programmaatoriga *Flip 3.4.7* abil. Väljundviikude testimiseks laeti *MCU*-sse lihtne programm, mis lülitab väljundviigu signaali sisse ja välja. Sellisel moel testiti üle kõik väljundviigud.

Kolmandana joodeti trükkplaadile *LED* maatriksi rea lülitamise süsteem. Seda põhjusel, et *CAT4101TV*-l on maandamise ja jahutamise jaoks all lai padi, mis on näha joonisel 5.2. Seetõttu tuleb *CAT4101TV* joota *PCB*-le kuumaõhu püstoliga. Sellisel moel jootes on oht sulatada lahti komponente või kuumutamise kahjustada vähem vastupidavaid elemente. Komponenti trükkplaadile jootmiseks kaeti kõigepealt *CAT4101TV* ühenduspadi õhukese kihi jootetina, seejärel asetati *CAT4101TV* elemendid kohale ning joodeti kuumaõhu püstoliga. Testimisel selgus, et üks *CAT4101TV* komponentidest on jootmisel kahjustunud.

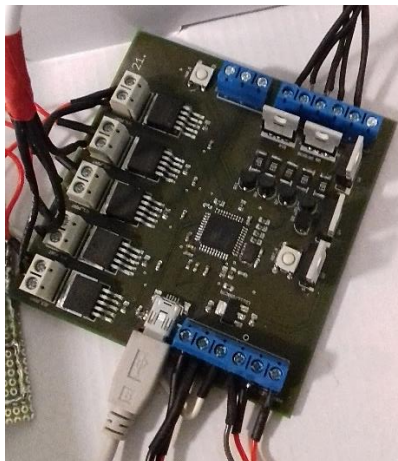


**Joonis 5.2.** *CAT4101TV* komponendi visualiseering. [26]

Viimaks joodeti plaadile kõik ülejäänud komponendid ning ühendati paneelil asuvad lüliti, potentsiomeetrid ja *LED*-id juhtmete abil kruviterminalidega. Mõningase testimise ja üksiku komponendi uuesti jootmise tulemusena saadi plaat tööle. Plaadile laeti tarkvaraarenduskeskkonnas *Atmel Studio 7.0* kirjutatud juhtprogramm, mille ülesandeks oli lülitada *LED* maatriksis ükshaaval *LED*-e sisse ja välja. Prototüübi juhtmoodul täitis eesmärgi.

## 5.2 Juhtmoodul

Prototüübi testimise sai juhtmooduli skeem arendatu edasi ning seetõttu erineb osaliselt prototüübi trükkplaat kirjeldatud lahendustest. Joonisel 5.1. on näha prototüübina valminud plaat. Prototüübi abil oli võimalik veenduda, et arendatava skeemi loogikaga saab projekti seadet juhtida.



**Joonis 5.1.** Juhtmooduli prototüüp.

Üks põhilisi erinevusi võrreldes prototüübi trükkplaadiga on juhitavate *LED*-ide arv. Kui prototüüp on mõeldud töötama 5 x 5 *LED* maatriksiga, siis töös kirjeldatud seade juhib 6 x 6 *LED* maatriksit.

### **5.3 Hetke olukord ja edasised sammud**

Järgmise sammuna tuleb valmistada juhtmooduli korpus. Korpuse ehitamiseks on vajalik kasutada: 1) laserlõikust karbi kaane, põhja ja külgede tootmiseks ning 2) 3D printimist korpuse kinnituselementide ja jalgade valmistamiseks. Seejärel on võimalik korpus kokku monteerida ning katsetada reaalse trükkplaadi sobivust korpusesse.

Kupli valmistamiseks tuleb kõigepealt valmistada ühendusmoodul. Ühendusmooduli abil lülitab juhtmoodul kupli *LED*-e sisse ja välja. Tuleb tellida trükkplaat ning sellele joota *RJ45* pistikud ja kruviterminalid. Järgmine samm ühendusmooduli valmistamiseks on kupli osade 3D printimine. Selleks tuleb printida kuppel, kaamerakinnitus ja ühendusmooduli osad. Seejärel tuleb valguselemendid kinnitada kupli külge ning ühendada juhtmed vastavalt *LED* maatriksile ühendusmooduli kruviterminalidega.

### **5.4 Seadme võimalikud edasiarendused**

Järgnevas loetelus on toodud välja lahendused, mida on kaalutud või planeeritakse seadme täiustamisel ette võtta:

1. Kasutada kaamera juhtimiseks läbi õhu levivaid lahendusi;
2. Kaamera ja juhtmooduli vaheline suhtlus muuta kahepoolseks;
3. Kasutaja informeerimine juhtmooduli ja kaamera ühendamisest;
4. Tõsta seadme niiskuskindlust;
5. Lisada seadmele ekraan, mis annaks kasutajale informatiivsemat tagasisidet;
6. Kaamera kinnituse stabiilsuse ja tugevuse tõstmine;
7. Sobivate kinnituste arendamine kompaktkaaameratele ja mikroskoopidele;
8. Integreerida kupliga pildistamise süsteem;

9. Vähendada juhtmooduli suurust;
10. Juhtmoodul integreerida kuplisse, muutes sellega seadme üheks tervikuks;
11. Seadme disain sobivaks masstootmise jaoks;
12. Koostada seadme hooldamise ja kasutamise juhend.

Praeguses etapis ei saa projekti tulemust pidada valmistooteks. Loodud on projekt, mis kirjeldab eesmärki täitvat seadet, kuid prototüüp on lõpuni valmis ehitamata ja testimata. Testimise järel selguks tõenäoliselt mitmeid aspekte, kuidas seadet saaks efektiivsemaks muuta.

## 6. MATERJALIDE SPETSIFIKATSIOON

### 6.1 Juhtmoodul

**Tabel 6.1.** Juhtmooduli komponentide nimekiri

Toode	Korpus	Kogus	Maksumus, €
Kondensaator 100 nF	SMD 0603	13	0,2
Kondensaator 18 pF	SMD 0603	2	0,2
Kondensaator 10 uF	SMD 0805	1	0,2
Kondensaator 1uF	SMD 0603	1	0,2
Takisti 10 k $\Omega$	SMD 0805	15	0,07
Takisti 560 $\Omega$	SMD 0805	6	0,07
Takisti 1 k $\Omega$	SMD 0805	2	0,07
Takisti 22 $\Omega$	SMD 0603	2	0,07
Takisti 100 $\Omega$	SMD 0805	2	0,07
CAT4101 <i>LED driver</i>	-	6	4,5
DMP10H400SE	SOT223	6	0,53
MMBT3904 FSCT-ND	SOT-23	6	0,108
ATMega32U4	-	1	3,98
LD1117S50CTR	SOT223	1	0,34
VOD211T	8-SOIC	1	0,82
B3F puute lüliti	-	2	2,63
Kruviterminal W237-02P	W237-132	3	1,86
LED	SMD 1206	2	1,21
DCJ0303	DCJ0303	1	1,23
RJHSE-L38X	RJ-45 pistik	2	1,64
USB pistik	mini-B	1	0,78
TXC143	-	1	0,34
Maksumus kokku:			60,08

Tabelis 6.1. välja toodud andmete järgi on juhtmooduli komponentide kogu maksumuseks 60 €. Mooduli komponentide hinnale lisandub veel trükkplaadi hind 10€. Kokku kulub juhmoduli trükiplaadi tootmisele 70 €

**Tabel 6.2.** Juhtmooduli korpuse materjalid

Toode	Kogus	Materjal	Materjali kogus	Maksumus, €
Külge A	2	polümetüülmetakrülaat 3mm	130x47x3 mm	1,50
Külge B	2	polümetüülmetakrülaat 3mm	110x47x3 mm	1,50
Põhi	1	Polümetüülmetakrülaat 3mm	130x110x3 mm	1,50
Kaas	1	polümetüülmetakrülaat 3mm	130x110x3 mm	1,50
Nurgik	8	ABS	1.77 g	-
Polt M2.5 x12 mm	4	metall	-	0,20
Polt M2.5 x 8 mm	20	metall	-	1,00
Mutter M2.5	24	metall	-	1,10
Polt M2.5x 6 mm	8	nailon		1,10
Distantspolt M2.5 10mm pesa/pesa	4	nailon		0,80
KOKKU				

Juhtmooduli korpuse valmistamiseks kasutatakse laserlõikust. Materjalide töötlemise hinda mitte arvestades läheb juhtmooduli korpus kokku maksma 10 €.

## 6.2 Kuppel

Kupli valmistamise hind sõltub suuresti detailide valmistamiseks kuluvast summast, sest kõik kupli elemendid väljaarvatud ühendusmoodul ja LED-id tuleb 3D printida. LED elemendid maksavad samuti küllaltki arvestatava hinnaga 4,99 € tükk. LED kogu maksumus on 179 €.

Kokku seadme prototüübi valmistamisele kulub hinnanguliselt ~260 €.



## 7. KOKKUVÕTE

Arheoloogia valdkonnas on kaasaskantava ja väikeste mõõtmetega *RTI* pildistamise seadme olemasolu tähtis. Seade võimaldab arheoloogidel esmapilgul ka vähem tähtsate muististe kiiret ja informatiivset talletamist *RTI* pildistamise näol. Seeläbi on võimalik hilisemal uurimisel saada mitmekesisemat informatsiooni väljakaevamistel leitud objektide kohta. Projekteeritav seade on mõeldud väikeste objektide *RTI* pildistamiseks.

Seadme arendamisel oli oluline tunda valdkonda. Seetõttu uuriti *RTI* tehnoloogia teoreetilist tausta. Valdkonna tundmiseks on oluline ka mõista, miks sihtgrupil sellist seadet tarvis on. Selleks võrreldi *RTI* meetodit, digitaalfotografeerimist ja konventsionaalset joonistamist muististe talletamisel.

Projekti edukaks täideviimiseks oli oluline ka arheoloogide nõuete välja selgitamine. Selleks korraldati nõupidamine ning arutati, millised on olulised aspektid ja parameetrid sihtgrupi jaoks. Lisaks sihtgrupi nõuetele oli tarvis teada, millised lahendused on juba kasutajatele kättesaadavad ning millised patendid on analoogsetele seadmetele olemas.

Lähteülesande püstitamine sai võimalikuks tänu *RTI* valdkonna tundmisele, sihtgrupi nõuetest arusaamisele, ja olemasolevate lahenduste uurimisele. Lähteülesanne seisneb seadme ülesehituse, funktsionaalsete ja konstruktsiooniliste nõuete täpses defineerimises. Samuti oli oluline ka mõtestada lahti seadme kasutajakogemus.

Diplomitöö põhiliseks rõhuasetuseks kujunes seadme projekteerimine. Seade koosneb kahest trükkplaadist, neid ümbritsevatest korpustest ning pildistamisatribuutika kinnitamiselementidest. Järgnevalt kirjeldati pikemalt lahendusi, mis võeti vastu elektroonika, korpuste ja püsivara disainimisel.

Diplomitöö käigus valmistati juhtmooduli prototüüp. Paraku selgus prototüübi ehitamise käigus, et juhtmooduli projekteerimisel on tehtud mitmeid valesid valikuid. Siiski sai juhtmooduli ehitamisel selgeks, et põhiline skeemi loogika töötab ning seade täidab püstitatud eesmärgi. Vajalik oli teha kokkuvõtte prototüübi puudujääkidest ning tuua diplomitöösse vastavad korrektuurid. Seetõttu erinevad oluliselt ka prototüübi juhtmoodul ja projekti lahendus. Projektis kirjeldatakse edasist prototüübi ehitamise plaani. Samuti on väljatoodud ideed ja lahendused, mida on võimalik rakendada seadme arendamiseks tulevikus.

Juhtmooduli ja kupli valmistamisel kasutatakse palju erinevaid komponente ja materjale. Need on toodud töös eraldi välja ning on hinnatud valmistatava seadme ligikaudne maksumus. Prototüübi ehitamise kulusid on hinnatud seadme autori poolt valmistamise korral. Tegeliku toote ehitamisel peab arvestama ka materjalide töötlemise kulusid, skeemide jootmisele minevaid töötunde ja seadme komplekteerimistasusid.

Kokkuvõttes on autor teatud tööga rahul. Projekt sisaldab kogu vajalikku informatsiooni töötava seadme ehitamiseks. Samuti omandas autor palju teadmisi elektroonika, raalprojekteerimise, valgusallikate, fotograafia ja prototüübi valmistamise valdkonnas.

## 8. KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] N. H. C. H. H. Samantha T.Porter, „Portable and low-cost solutions to the imaging of Paleolithic art objects: A comparison of photogrammetry and reflectance transformation imaging,“ *Journal of Archaeological Science: Reports*, lk. 859-863, December 2016.
- [2] The Economist, „The Economist,“ 25 Märts 2010. [Võrgumaterjal]. Saadaval: [https://www.economist.com/node/15767271?story\\_id=15767271](https://www.economist.com/node/15767271?story_id=15767271).
- [3] Cultural Heritage Imaging, „Cultural Heritage Imaging,“ April 2018. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://culturalheritageimaging.org/Technologies/RTI/>.
- [4] C. Schroer, *RTI Example: Papyrus Fragment*, California: Cultural Heritage Imaging, 2018.
- [5] L. Pawlowicz, „Reflectance Transformation Imaging For Lithics,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: [http://rtimage.us/?page\\_id=86](http://rtimage.us/?page_id=86). [Kasutatud 29 Aprill 2018].
- [6] L. Pawlowicz, „Reflectance Transformation Imaging For Lithics,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: [http://rtimage.us/?page\\_id=18](http://rtimage.us/?page_id=18). [Kasutatud 2018].
- [7] Cultural Heritage Imageing, „Cultural Heritage Imageing,“ 2018. [Võrgumaterjal]. Saadaval: [http://culturalheritageimaging.org/What\\_We\\_Offer/Downloads/View/](http://culturalheritageimaging.org/What_We_Offer/Downloads/View/).
- [8] A. BENJAMIN, „POLYNOMIAL TEXTURE MAPPING AND REFLECTANCE TRANSFORMATION IMAGING APPARATUS AND TECHNIQUES“. USA Patent US2016116825 , 28 Aprill 2016.
- [9] M. C. M. C. R. S. Matteo Dellepiane, „High Quality PTM Acquisition: Reflection Transformation Imaging for Large Objects,“ *he 7th International Symposium on VAST International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage*, kd. Nov, pp. 179--186, 2006.
- [10] M. O'Brien, „Random Camera Blog,“ 17 March 2014. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://randomphoto.blogspot.com/2014/03/photography-of-different-sort.html>. [Kasutatud Mai 2018].
- [11] T. Kinsman, „An Easy To Build Reflectance Transformation Imaging (RTI) System,“ *Journal of Biocommunication*, kd. 40, nr 1, pp. 10,11, 2016.

- [12] T. kinsman, „makezine,“ 12 Aprill 2016. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://makezine.com/projects/shoot-super-detailed-macro-photographs-with-an-rti-camera-rig/>. [Kasutatud Mai 2018].
- [13] L. Pawlowicz, „Reflectance Transformation Imaging For Lithics,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: [http://rtimage.us/?page\\_id=27](http://rtimage.us/?page_id=27). [Kasutatud Mai 2018].
- [14] R-B, „Embedded Lab,“ 28 Aprill 2011. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://embedded-lab.com/blog/lab-12-basics-of-led-dot-matrix-display/>. [Kasutatud Mai 2018].
- [15] amandaghassaei, „Instructables,“ 6 Juuni 2012. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.instructables.com/id/Multiplexing-with-Arduino-and-the-74HC595/>. [Kasutatud 27 Aprill 2018].
- [16] electronicsnotes, „electronicsnotes,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: [https://www.electronics-notes.com/articles/electronic\\_components/surface-mount-technology-smd-smt/packages.php](https://www.electronics-notes.com/articles/electronic_components/surface-mount-technology-smd-smt/packages.php). [Kasutatud 2018].
- [17] A. Ryan, „Slideplayer,“ 2016. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://slideplayer.com/slide/8044201/#>. [Kasutatud Mai 2018].
- [18] J. Freeman, „AVSforum,“ 25 September 2014. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.avsforum.com/forum/139-display-calibration/1699217-how-important-backlight-spectrum.html>. [Kasutatud Mai 2018].
- [19] Cree, Inc. , „Cree Product family data sheet,“ 2014. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.ledsupply.com/content/pdf/CXA1310.pdf>. [Kasutatud Mai 2018].
- [20] LEDdynamics, Inc., „LUXdrive,“ LEDdynamics, Inc., 2006-2018. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.luxdrive.com/products/indus-star-a007-a008/>. [Kasutatud Mai 2018].
- [21] Breeze Systems Limited, „Firing multiple cameras at the same time,“ Breeze Systems Limited, 2017. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.breezesys.com/MultiCamera/release.htm>. [Kasutatud Mai 2018].
- [22] breezesys, „Breeze,“ 2017. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.breezesys.com/MultiCamera/release.htm>. [Kasutatud 5 Mai 2018].
- [23] Vishay Semiconductors, „<https://www.vishay.com>,“ 8 Veebruar 2017. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.vishay.com/docs/81956/vod205t.pdf>. [Kasutatud 23 Mai 2018].
- [24] STMicroelectronics, „Mouser Electronics, Inc,“ 2013. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.mouser.ee/datasheet/2/389/ld1117-974075.pdf>. [Kasutatud Mai 2018].

- [25] Atmel Corporation, „ATmega16U4/32U4 Datasheet,“ 2010. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.pjrc.com/teensy/atmega32u4.pdf>. [Kasutatud 5 Mai 2018].
- [26] Digi-Key Electronics., „digikey,“ Digi-Key Electronics., 2018. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.digikey.com/product-detail/en/on-semiconductor/CAT4101TV-T75/CAT4101TV-T75CT-ND/1933886>. [Kasutatud 2018].
- [27] K. M. T. M. Graeme Earl, „Archaeological applications of polynomial texture mapping: analysis,“ *Journal of Archaeological Science*, 2010.
- [28] Maxim Integrated Products, „Maxim Integrated,“ Maxim Integrated Products, Veebruar 2013. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://web.archive.org/web/20160813012356/https://www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/1880>. [Kasutatud 27 Aprill 2018].
- [29] Mouser Electronics, „Mouser Electronics,“ Mouser Electronics, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.mouser.ee/new/lumileds/philipslumileds-LuxeonRebel/>. [Kasutatud 27 Aprill 2018].
- [30] DSM&T Co, „Custom Wire Harnesses & Speciality Connectors,“ DSM&T Co, 2018 . [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.dsmt.com/resources/ip-rating-chart/>. [Kasutatud 2 Mai 2018 ].
- [31] LEDdynamics, Inc, „Luxdrive by LEDdynamics,“ Aprill 2011. [Võrgumaterjal]. Saadaval: [http://www.luxdrive.com/content/A007\\_A008\\_Data\\_Sheet\\_V1.2.pdf](http://www.luxdrive.com/content/A007_A008_Data_Sheet_V1.2.pdf). [Kasutatud 4 Mai 2018].
- [32] Cree, Inc., „Cree XLamp XP-E LED Data sheet,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.cree.com/led-components/media/documents/XLampXPE-25A.pdf>. [Kasutatud 4 Mai 2018].
- [33] EZ Tops World Wide Inc, „Plastic Domes Made to Order,“ EZ Tops World Wide Inc, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.eztopsworldwide.com/domes.htm>. [Kasutatud 21 05 2018].

## 9. SUMMARY

For archeologists, it is important to have a portable RTI imaging device available. This allows preserving objects in form of an *RTI* image in less time than it would take with conventional methods. Faster imaging allows archeologists to save objects digitally even if they do not seem that important at first. In this way, it is possible to obtain more versatile information about objects found in excavations for later study. The projected device is designed to take pictures of small objects in order to make *RTI* images.

To develop this project it was important to know the background information about the device. Therefore, the theoretics of the RTI technology was studied. It was also important to understand why the target group needs this kind of device. In order to understand target group: RTI method, digital photography, and conventional drawing of antiquities were compared. Importance of clarifying archaeologists requirements for the successful completion of the project cannot be underestimated. For this purpose, a meeting was organized for discussing the important aspects and parameters for the target group. In addition to the requirements of the target group, it was necessary to know what solutions are already available to users and which patents exist for similar devices.

Defining the tasks needed for the successful development of the device was only possible because of the gathered RTI technology knowledge, information about target requirements, and the study of existing available solutions. The main task was to precisely define the structure of the device and functional and structural requirements. It was also important to understand the user experience of the device.

The main focus of the diploma thesis was to design the device. The device consists of two printed circuit boards, device cases, and accessories for the imaging feature. The solutions that were developed are explained.

During the diploma work, the prototype of the control module was constructed. During the testing of the prototype, a number of design flaws were found in the unit. However, it became clear that main logic of the circuit board works and the requirements for the project objective can be fulfilled. It was necessary to summarize the shortcomings of the prototype and to bring the corrections to the thesis. Therefore, the prototype control module and project solution are different. The project also plans steps that are needed in order to build a new prototype version. Ideas and solutions in order to upgrade the device in the future are mentioned.

A variety of components and materials are used to make the control unit and cupola. These are presented in the work. The cost of the device is also estimated taking into account that the author is the constructor. The cost of an actual product would also include processing of materials and workforce salaries for soldering *PCB* and construction of the device.

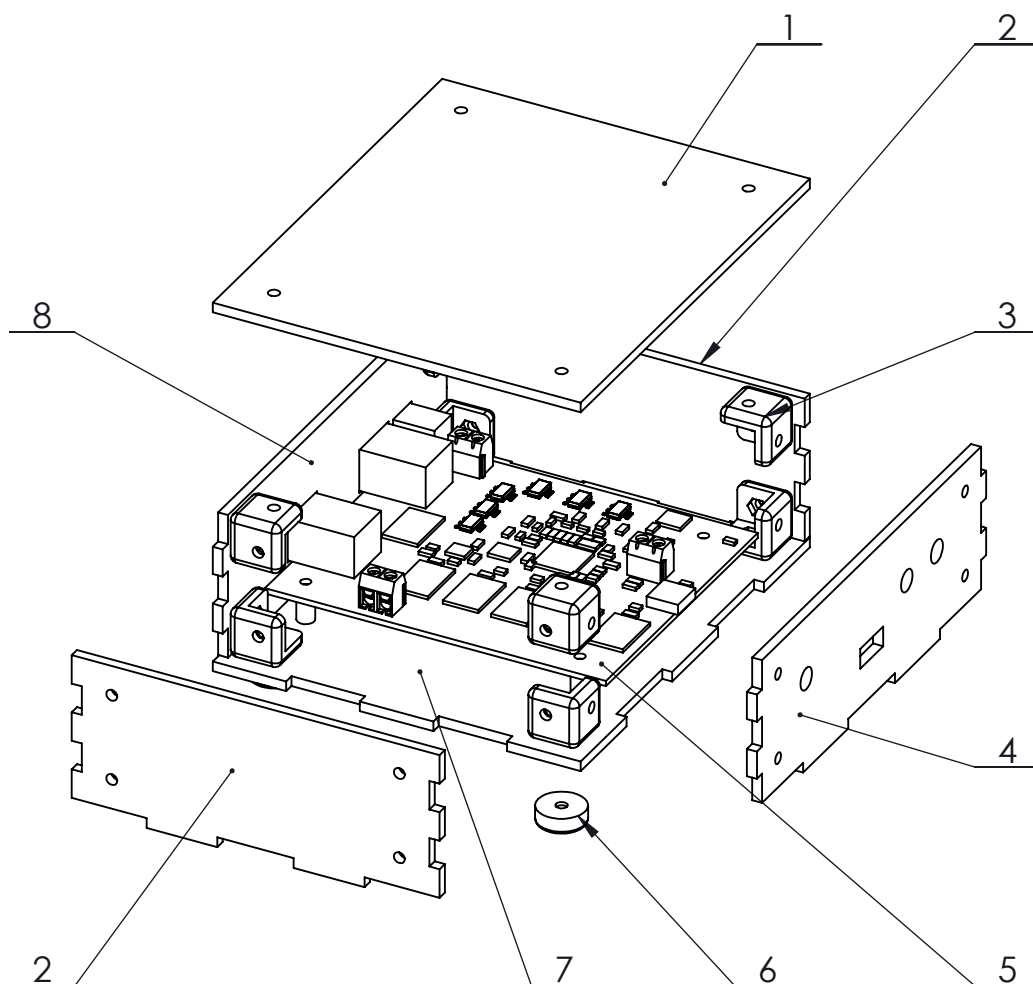
It turned out that the project was more complicated than initially expected. More time was needed in order to complete the construction of project's prototype. In order to make an ergonomic and efficient product out of this project, the cycle of prototype construction and testing must be repeated more than once.

In conclusion, the author is satisfied with the work done in this thesis. The project contains all the necessary information for the construction of an operating device. A lot of knowledge and experience was gained in the fields of electronics, computer-aided design, light sources, photography and prototype production.

**LISAD**

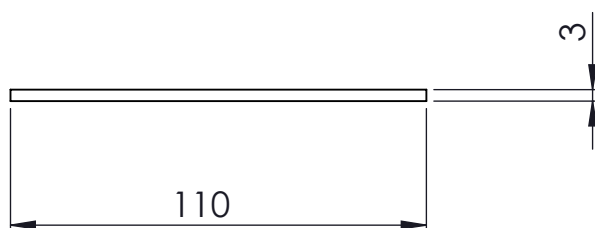
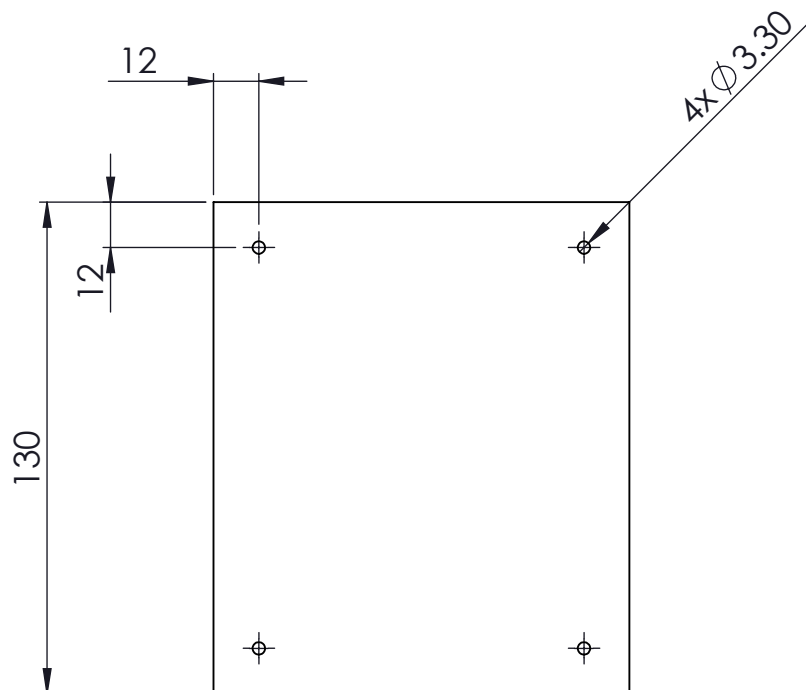


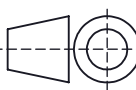
**LISA A**

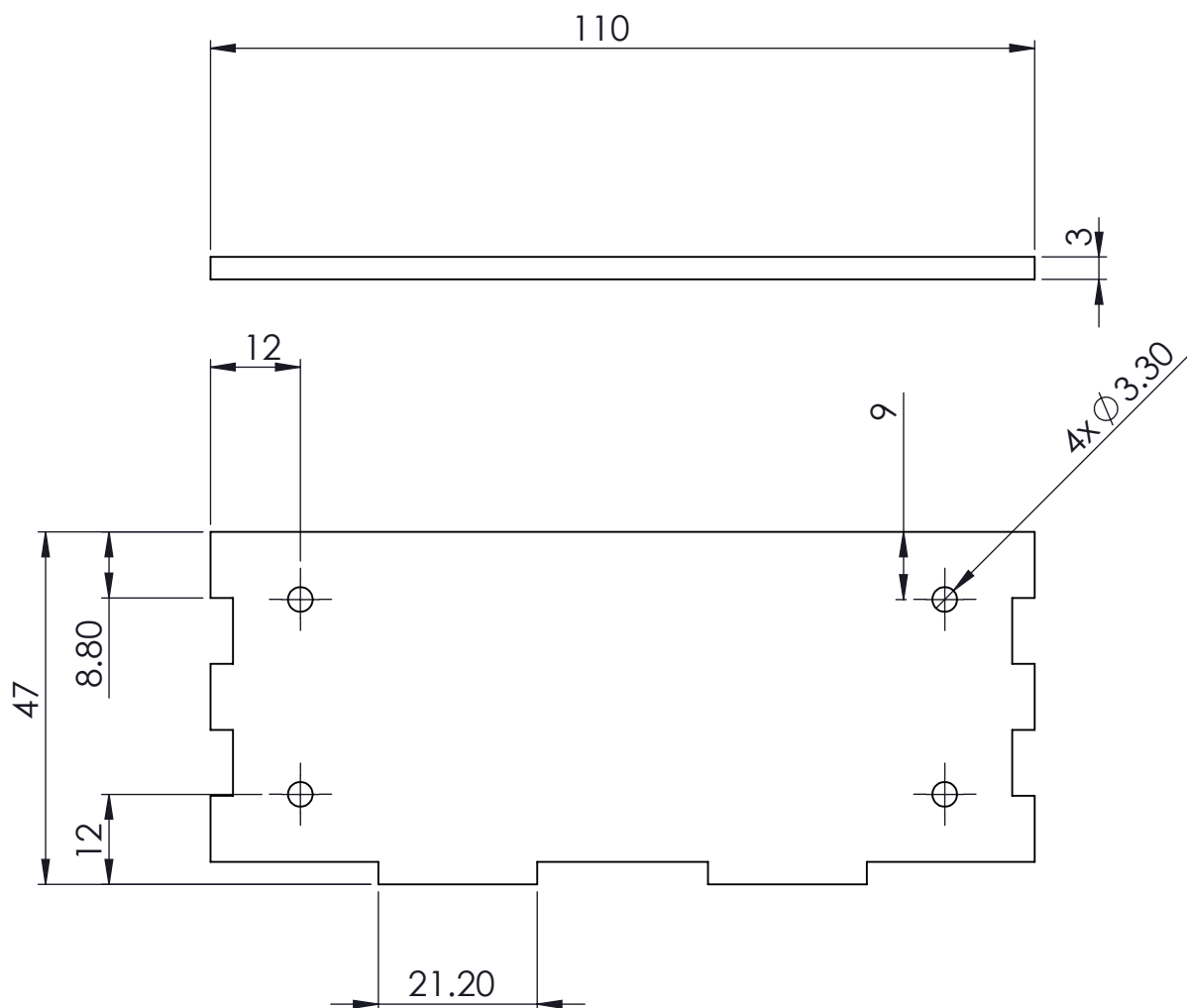


	Materjal:	Näitamata piirhääbed: ISO 2768-m	Mass 215g	Mõõt 1:5
Teostas Kontrollis Kinnitas	Hendrik-Kristjan Sikk Erkki Jõgi Erkki Jõgi	Nimetus: Juhtmooduli korpus Koost		
EMÜ TS-TN		Leht: 1/9	Tähis: TN 18/140456 A 01 00 K	

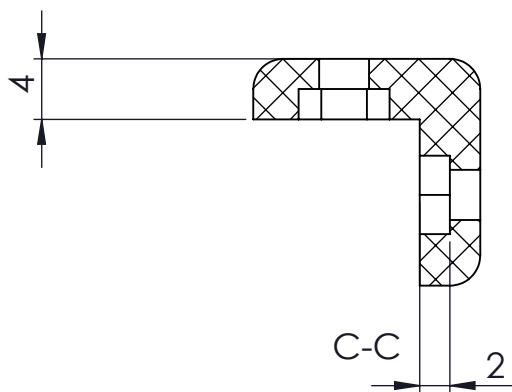
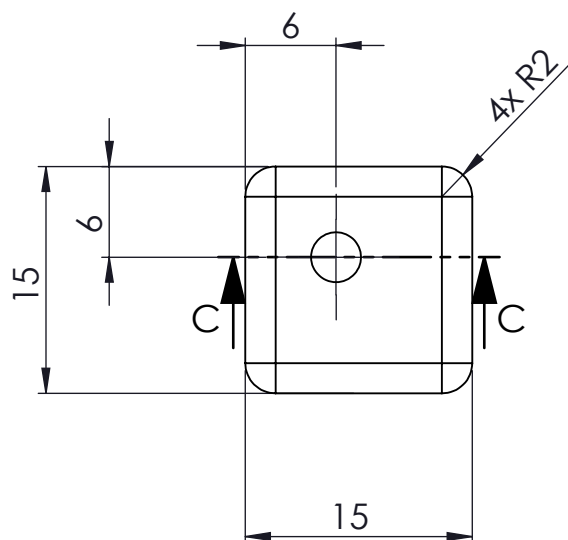
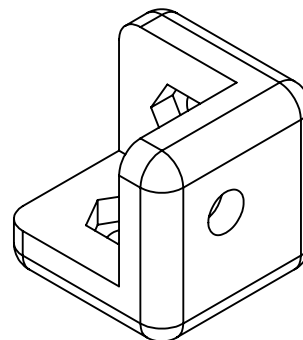
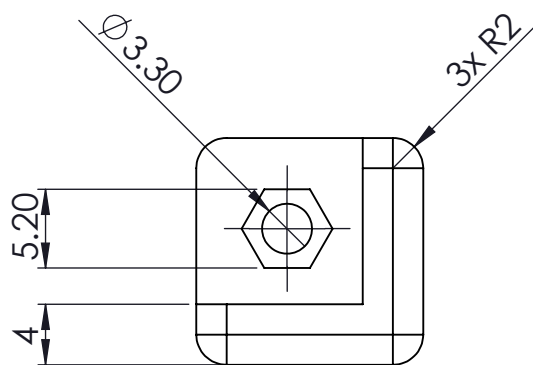
8		Tagapaneel	TN 18/140456 A 01 08 D	1	
7		Põhi	TN 18/140456 A 01 07 D	1	
6		Seadme jalg	TN 18/140456 A 01 06 D	4	
5		Trükkplaat	-	1	
4		Kasutajaliides	TN 18/140456 A 01 05 D	1	
3		Nurkkinnituselement	TN 18/140456 A 01 04 D	8	
2		Küljepaneel	TN 18/140456 A 01 03 D	2	
1		Kaas	TN 18/140456 A 01 02 D	1	
Osa	Väli	Nimetus	Tähis	Hulk	Märkus:
		Materjal:	Näitamata piirhäbed: ISO 2768-m	Mass	Mööõt
Teostas	Hendrik-Kristjan Sikk		Nimetus:  Juhtmooduli korpuse komponentide nimekiri		
Kontrollis	Erkki Jõgi				
Kinnitas	Erkki Jõgi				
EMÜ TS-TN			Leht: 2/9	Tähis:  TN 18/140456 A 01 01 K	



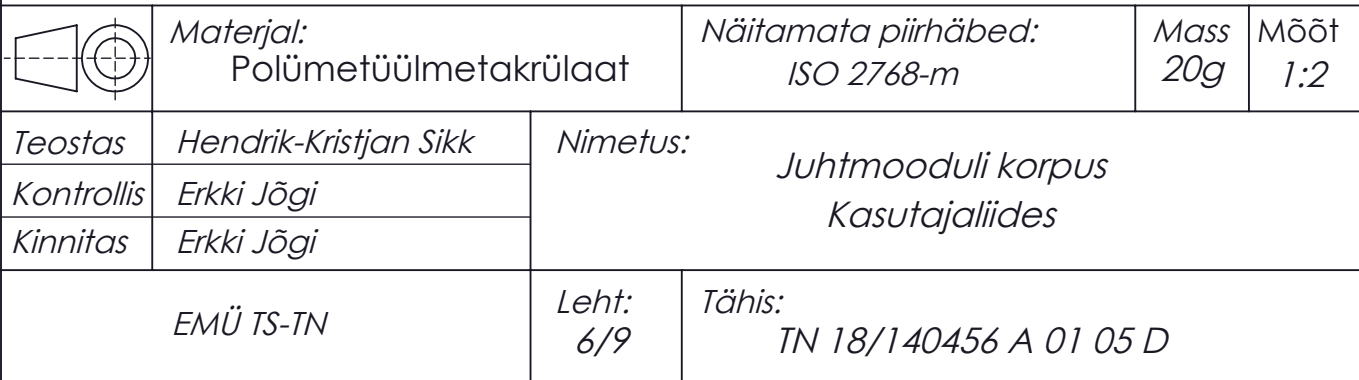
	<i>Materjal:</i> Polümetüülmetakrülaad		<i>Näitamata piirhääbed:</i> ISO 2768-m	<i>Mass</i> 51g	<i>Mööõt</i> 1:5
<i>Teostas</i>	Hendrik-Kristjan Sikk	<i>Nimetus:</i> Juhtmooduli korpus Kaas			
<i>Kontrollis</i>	Erkki Jõgi				
<i>Kinnitas</i>	Erkki Jõgi				
EMÜ TS-TN		<i>Leht:</i> 3/9	<i>Tähis:</i> TN 18/140456 A 01 02 D		

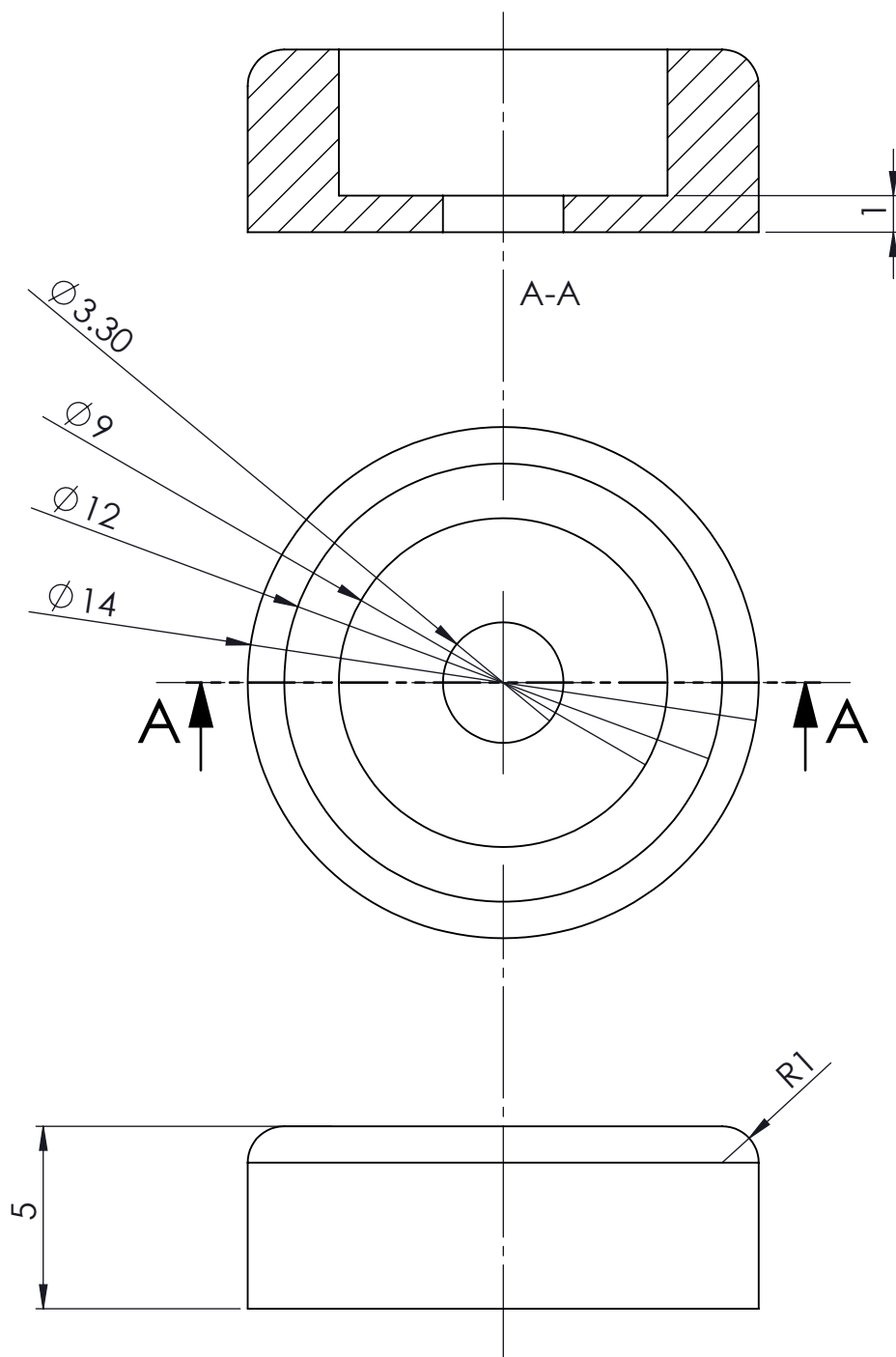


	<i>Materjal:</i> Polümetüülmetakrülaat		<i>Näitamata piirhäbed:</i> ISO 2768-m	<i>Mass</i> 18g	<i>Mööõt</i> 1:1
<i>Teostas</i>	Hendrik-Kristjan Sikk	<i>Nimetus:</i> Juhtmooduli korpus Külgpaneel			
<i>Kontrollis</i>	Erkki Jõgi				
<i>Kinnitas</i>	Erkki Jõgi				
EMÜ TS-TN		<i>Leht:</i> 4/9	<i>Tähis:</i> TN 18/140456 A 01 03 D		



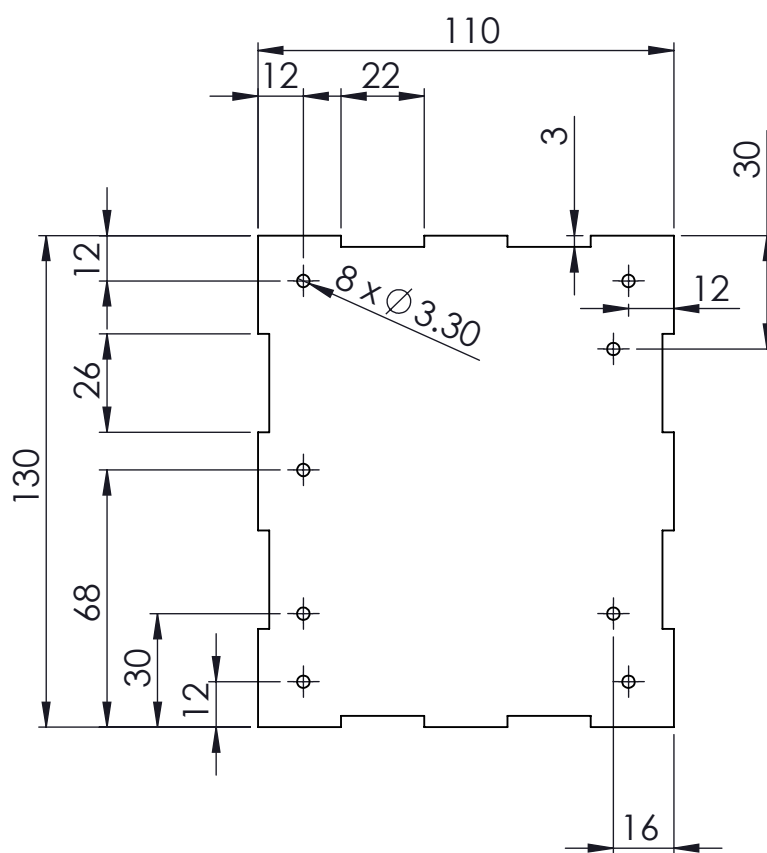
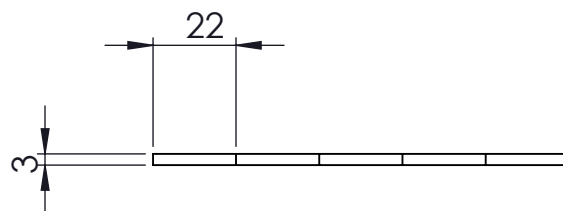
	<i>Materjal:</i> <i>Akrüülnitriilbutadieenstüreen</i>		<i>Näitamata piirhääbed:</i> <i>ISO 2768-m</i>	<i>Mass</i> <i>2g</i>	<i>Mõõt</i> <i>2:1</i>
<i>Teostas</i>	Hendrik-Kristjan Sikk	<i>Nimetus:</i>  <i>Juhtmooduli korpus</i> <i>Nurgakinnituselement</i>			
<i>Kontrollis</i>	Erkki Jõgi				
<i>Kinnitas</i>	Erkki Jõgi				
<i>EMÜ TS-TN</i>		<i>Leht:</i> <i>5/9</i>	<i>Tähis:</i> <i>TN 18/140456 A 01 04 D</i>		

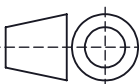


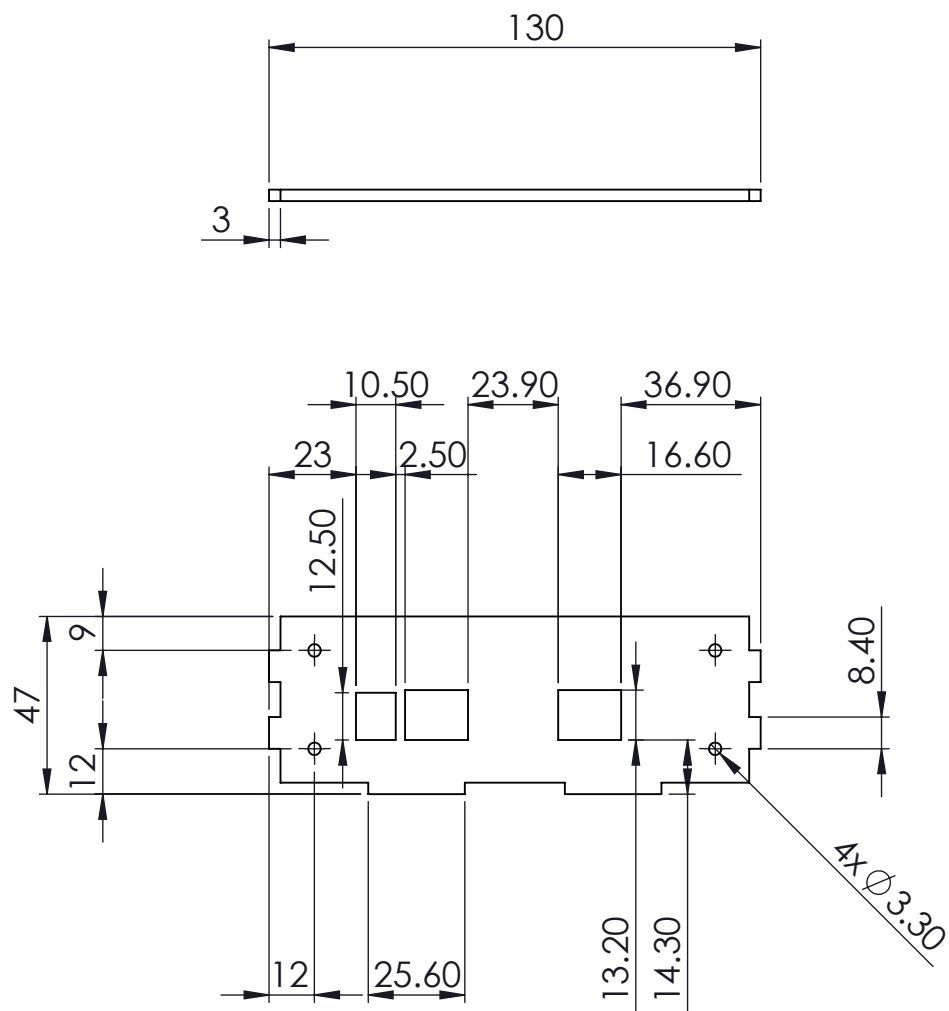


	<b>Materjal:</b> Akrüülnitriilbutadienstüreen		<b>Näitamata piirhääbed:</b> ISO 2768-m	<b>Mass</b> 1g	<b>Mööõt</b> 5:1
<b>Teostas</b>	Hendrik-Kristjan Sikk	<b>Nimetus:</b> Juhtmooduli korpus Seadme jalg			
<b>Kontrollis</b>	Erkki Jõgi				
<b>Kinnitas</b>	Erkki Jõgi				
EMÜ TS-TN		<b>Leht:</b> 7/9	<b>Tähis:</b> TN 18/140456 A 01 05 D		



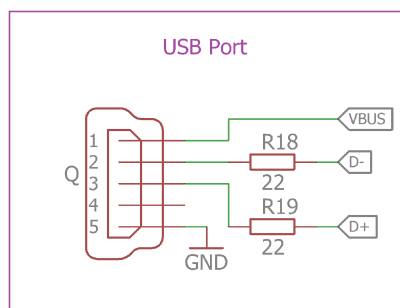


	<i>Materjal:</i> Polümetüülmetakrülaat		<i>Näitamata piirhääbed:</i> ISO 2768-m	<i>Mass</i> 49g	<i>Mööõt</i> 1:5
<i>Teostas</i>	Hendrik-Kristjan Sikk	<i>Nimetus:</i> Juhtmooduli korpus Põhi			
<i>Kontrollis</i>	Erkki Jõgi				
<i>Kinnitas</i>	Erkki Jõgi				
EMÜ TS-TN		<i>Leht:</i> 8/9	<i>Tähis:</i> TN 18/140456 A 01 07 D		

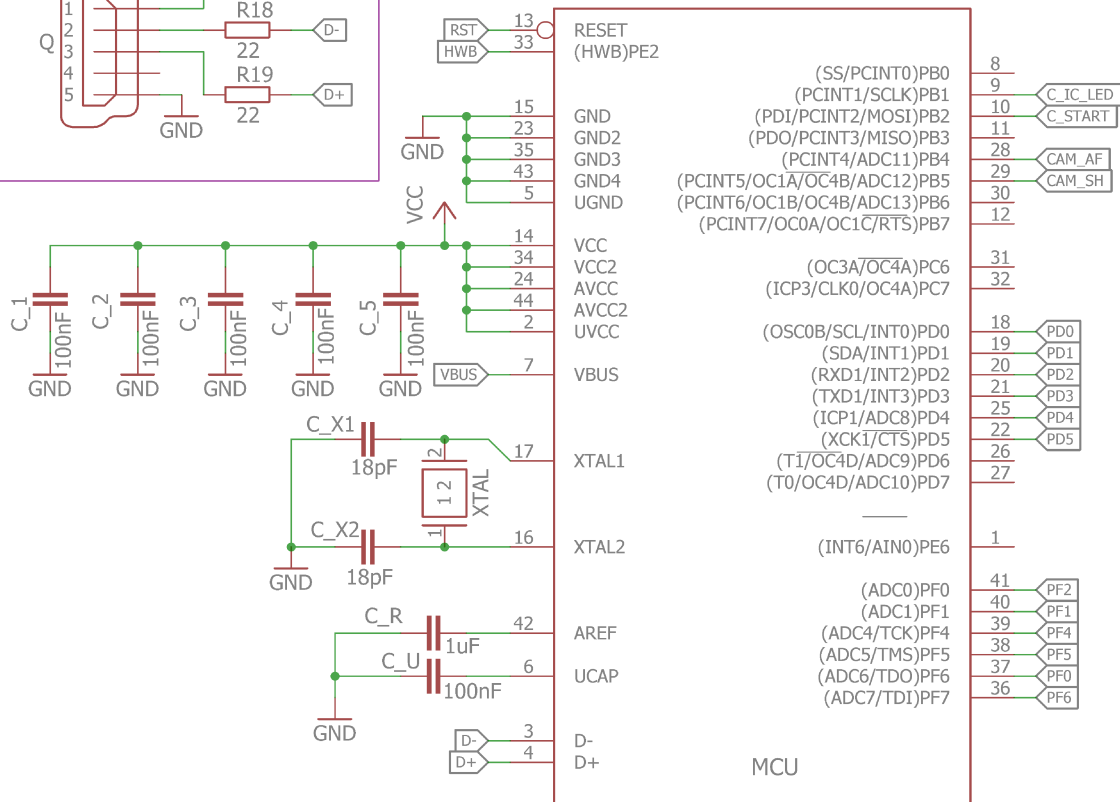
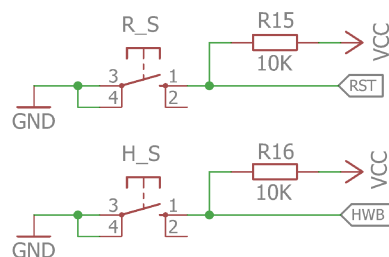


	Materjal: Polümetüülmetakrülaad		Näitamata piirhääbed: ISO 2768-m	Mass 18g	Mööõt 1:2
Teostas	Hendrik-Kristjan Sikk	Nimetus: Juhtmooduli korpus Tagapaneel			
Kontrollis	Erkki Jõgi				
Kinnitas	Erkki Jõgi				
EMÜ TS-TN		Leht: 9/9	Tähis: TN 18/140456 A 01 07 D		

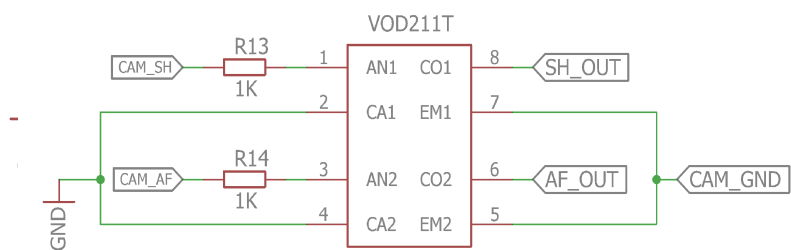
**LISA B**



Reset ja Hardware boot lülitid

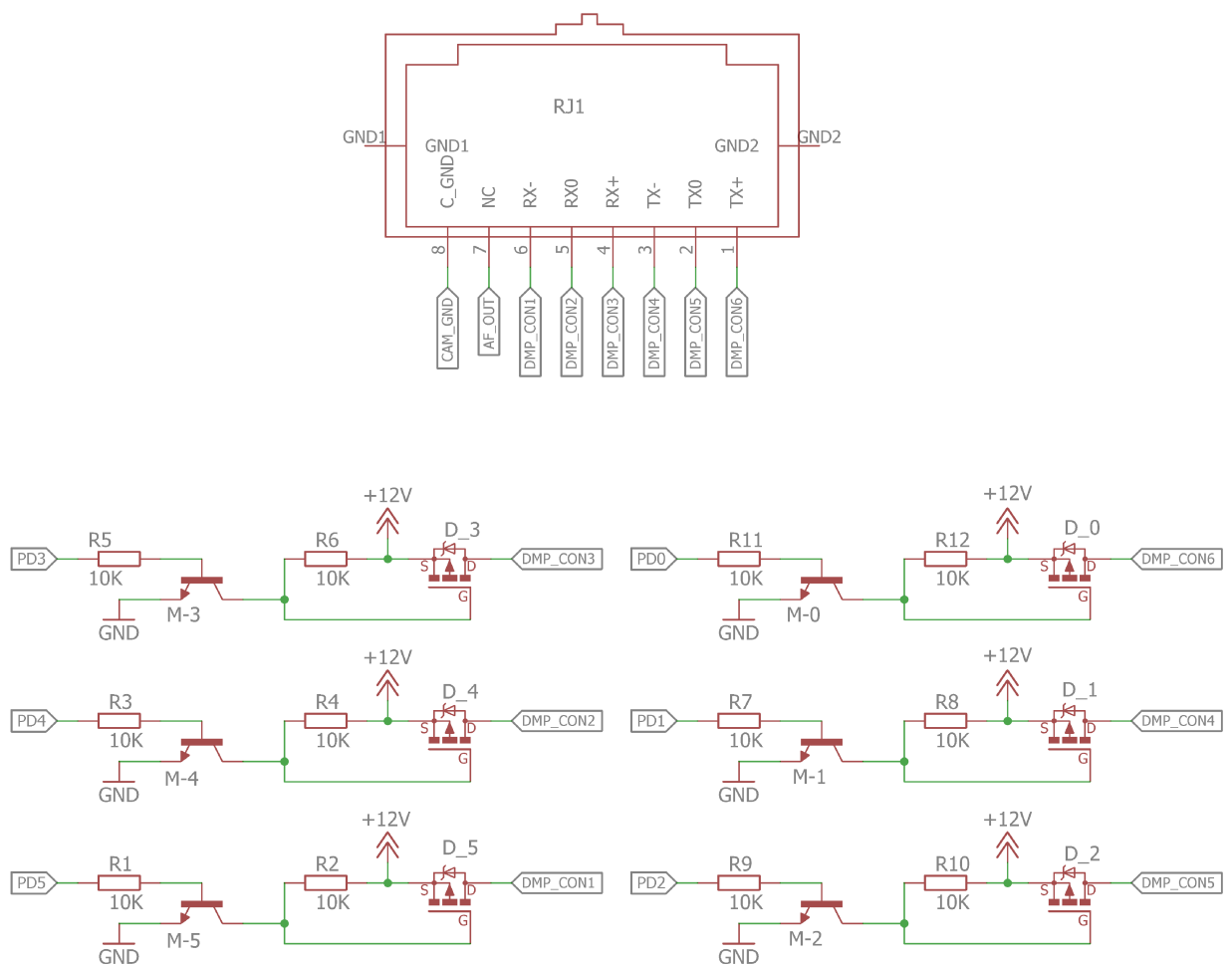


Teostas	Hendrik-Kristjan Sikk	Nimetus: Mikroprotsessori moodul	
Kontrollis	Erkki Jõgi		
Kinnitas	Erkki Jõgi		
EMÜ TS-TN		Leht: 1/7	Tähis: TN 18/140456 B 01 00 S

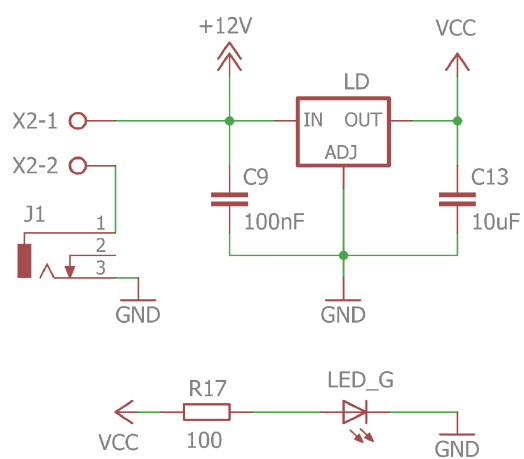


Teostas	Hendrik-Kristjan Sikk	Nimetus:  Kaamerasignaali moodul	
Kontrollis	Erkki Jõgi		
Kinnitas	Erkki Jõgi		
EMÜ TS-TN		Leht: 2/7	Tähis: TN 18/140456 B 01 01 S



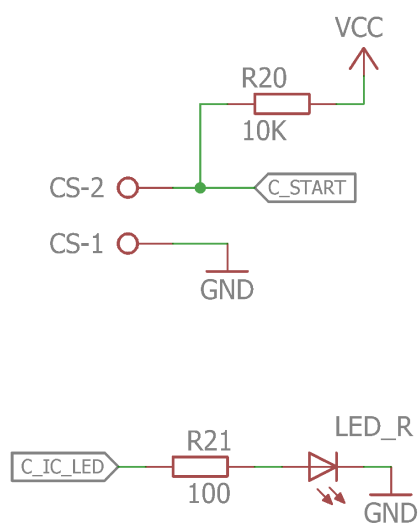


Teostas	Hendrik-Kristjan Sikk	Nimetus:  <i>LED maatriksi veeru moodul</i>	
Kontrollis	Erkki Jõgi		
Kinnitas	Erkki Jõgi		
EMÜ TS-TN		Leht: 4/7	Tähis: TN 18/140456 B 01 03 S



Teostas	Hendrik-Kristjan Sikk	Nimetus:  Toitemoodul	
Kontrollis	Erkki Jõgi		
Kinnitas	Erkki Jõgi		
EMÜ TS-TN		Leht: 5/7	Tähis: TN 18/140456 B 01 04 S

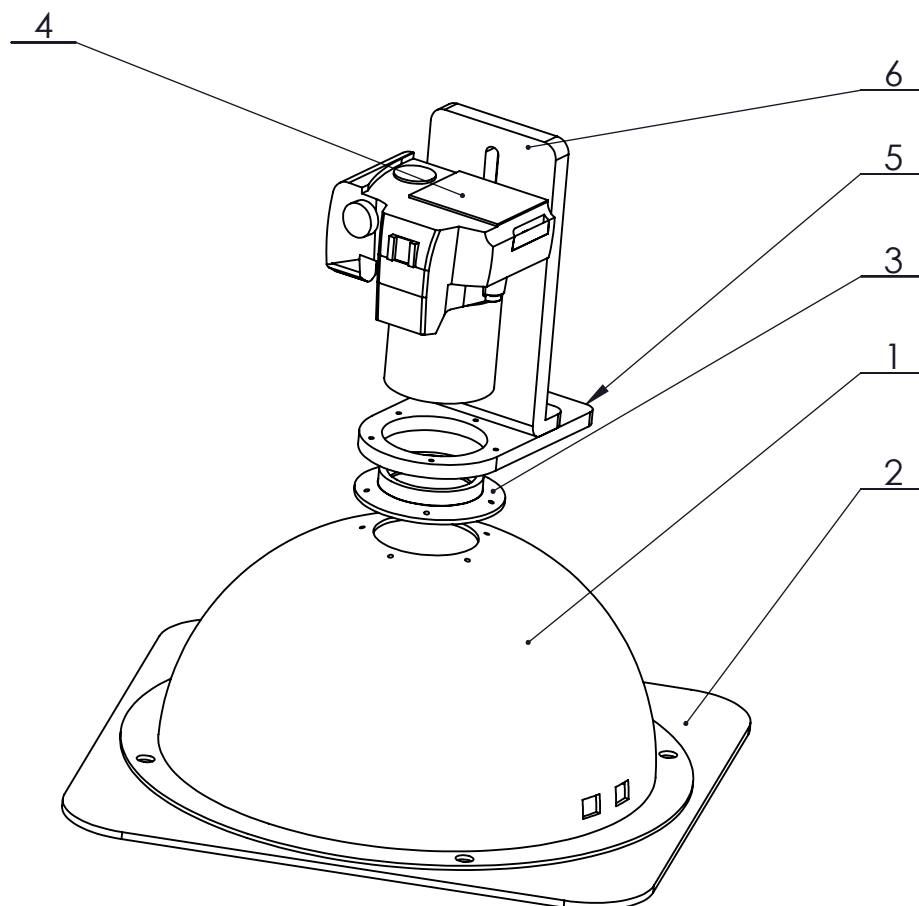


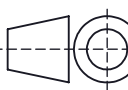


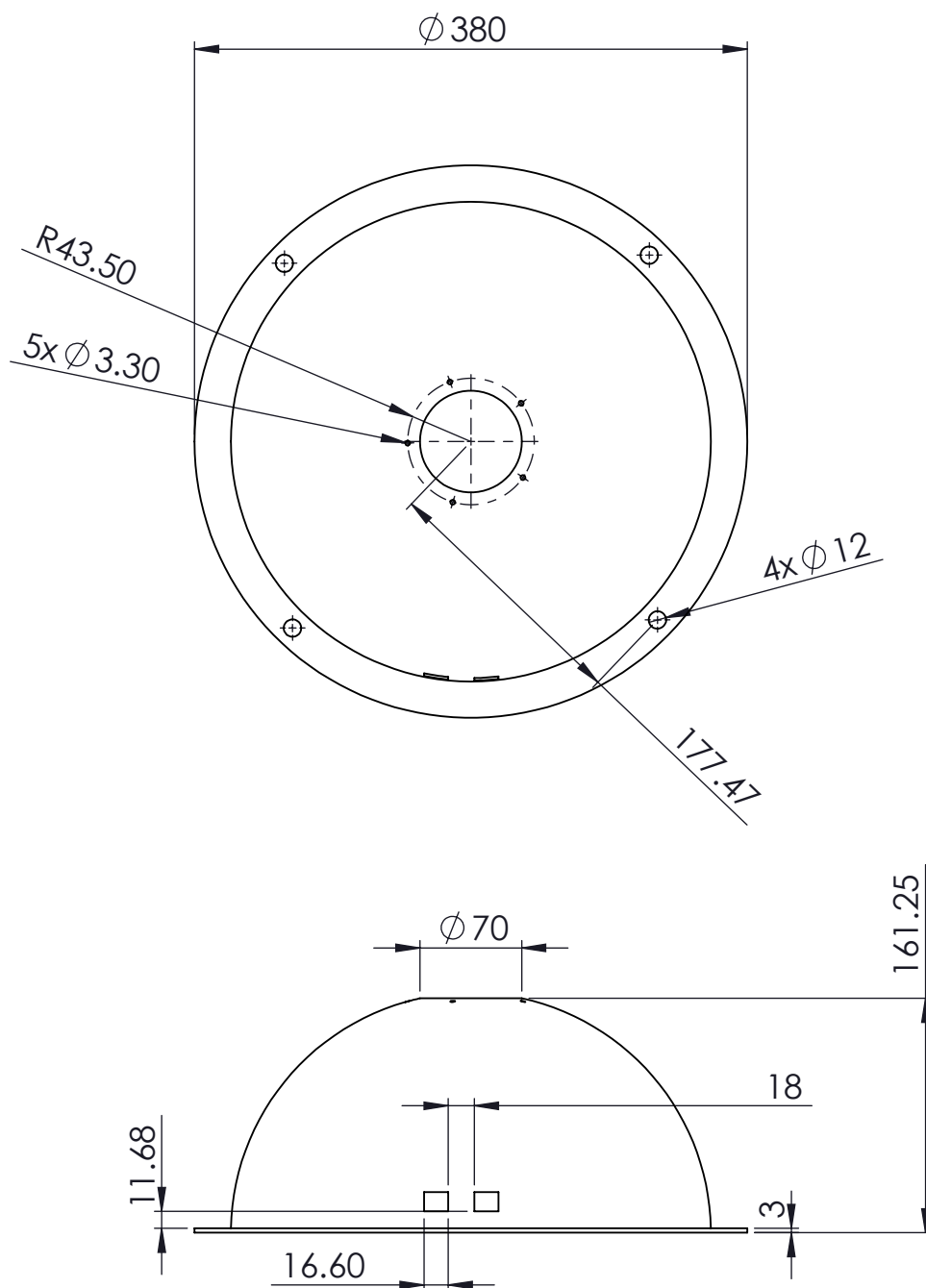
Teostas	Hendrik-Kristjan Sikk	Nimetus:  Töötuskklimoodul	
Kontrollis	Erkki Jõgi		
Kinnitas	Erkki Jõgi		
EMÜ TS-TN		Leht: 6/7	Tähis: TN 18/140456 B 01 05 S

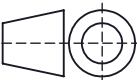
LD	LD117AS12TR pingeregulaator	1	
J1	DCJ0303 toite sisend	1	
C_U	100 nf kondensaator	1	
C_R	1 uf kondensaator	1	
PC1	Kruviterminal	1	
X2	Kruviterminal	1	
CS	Kruviterminal	1	
C13	10 uf kondensaator	1	
VOD21T	Kahe kanaliga optosiolaator	1	
TXC	Kvartsosstsillator	1	
MCU	ATmega32U4 mikroprotsessor	1	
R_S	Ennistatud surunupp	1	
H_S	Ennistatud surunupp	1	
C_X1-2	18 pf kondensaator	2	
Q	USB port MINI-B	1	
LED_G/R	Valgusdiod	2	
U\$7-8	RJ45 pistmik	2	
R20	10 k Takisti	1	
R21	100 Takisti	1	
R17	100 Takisti	1	
R18-19	22 Takisti	2	
R15-16	10 k Takisti	2	
R13-14	1k Takisti	2	
R22-27	560 Takisti	6	
R1-12	10 k Takisti	12	
M-0-5	MMBT3904FSCT NPN BJT Transistor	6	
D_0-5	DMP10H400SE P-kanaliga MOSFET	6	
CC_1-6	100 nF kondensaator	6	
C_1-5	100 nF kondensaator	5	
A1-6	CAT4101 LED driver	6	
Tähis	Nimetus	Hulk	Märkus:
Tellija		Objekt, seade RTI seadme Juhtmoodul	
Teostas	Hendrik-Kristjan Sikk	Nimetus: Juhtmooduli komponentide nimekiri	
Kontrollis	Erkki Jõgi		
Kinnitas	Erkki Jõgi		
EMÜ TS-TN		Leht: 7/7	Tähis: TN 18/140456 B 01 06 S

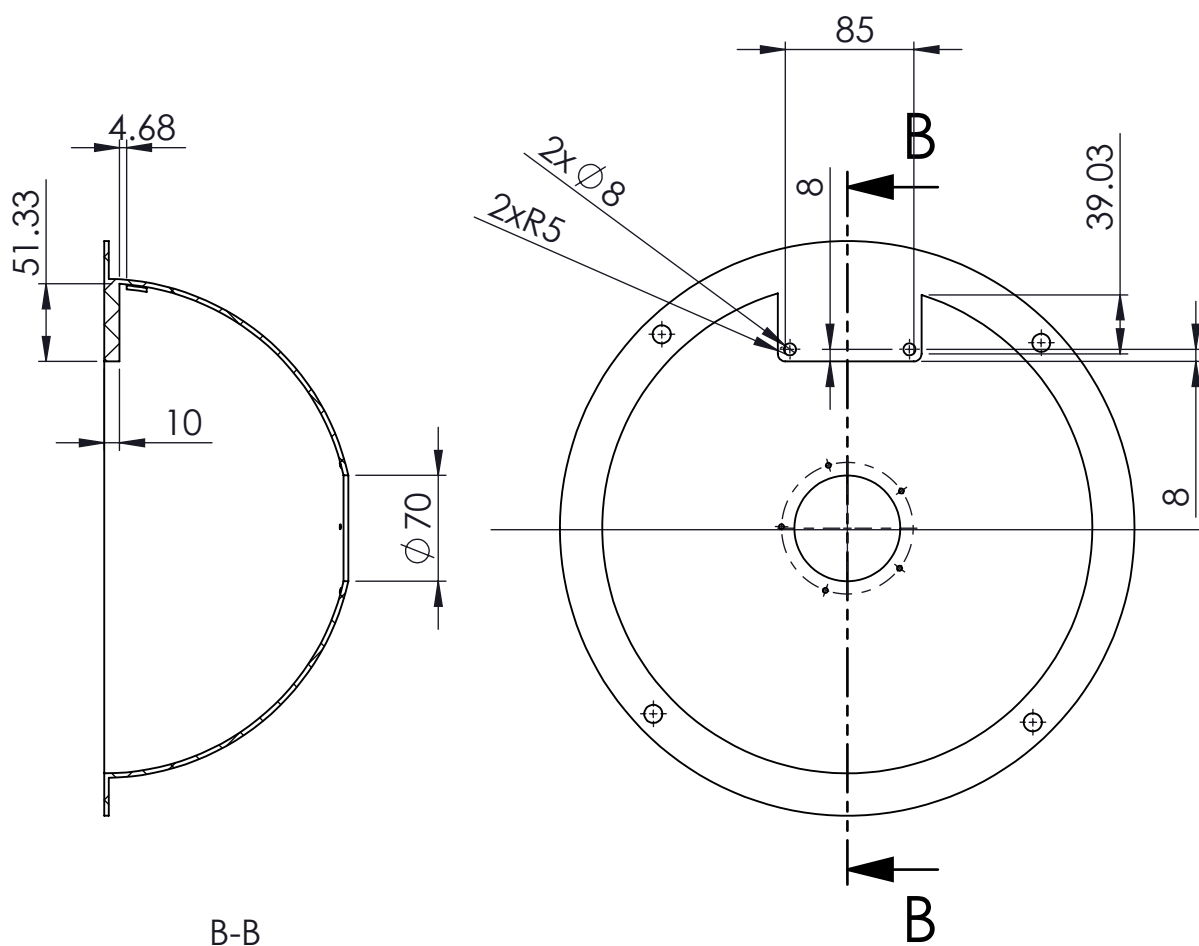
**LISA C**



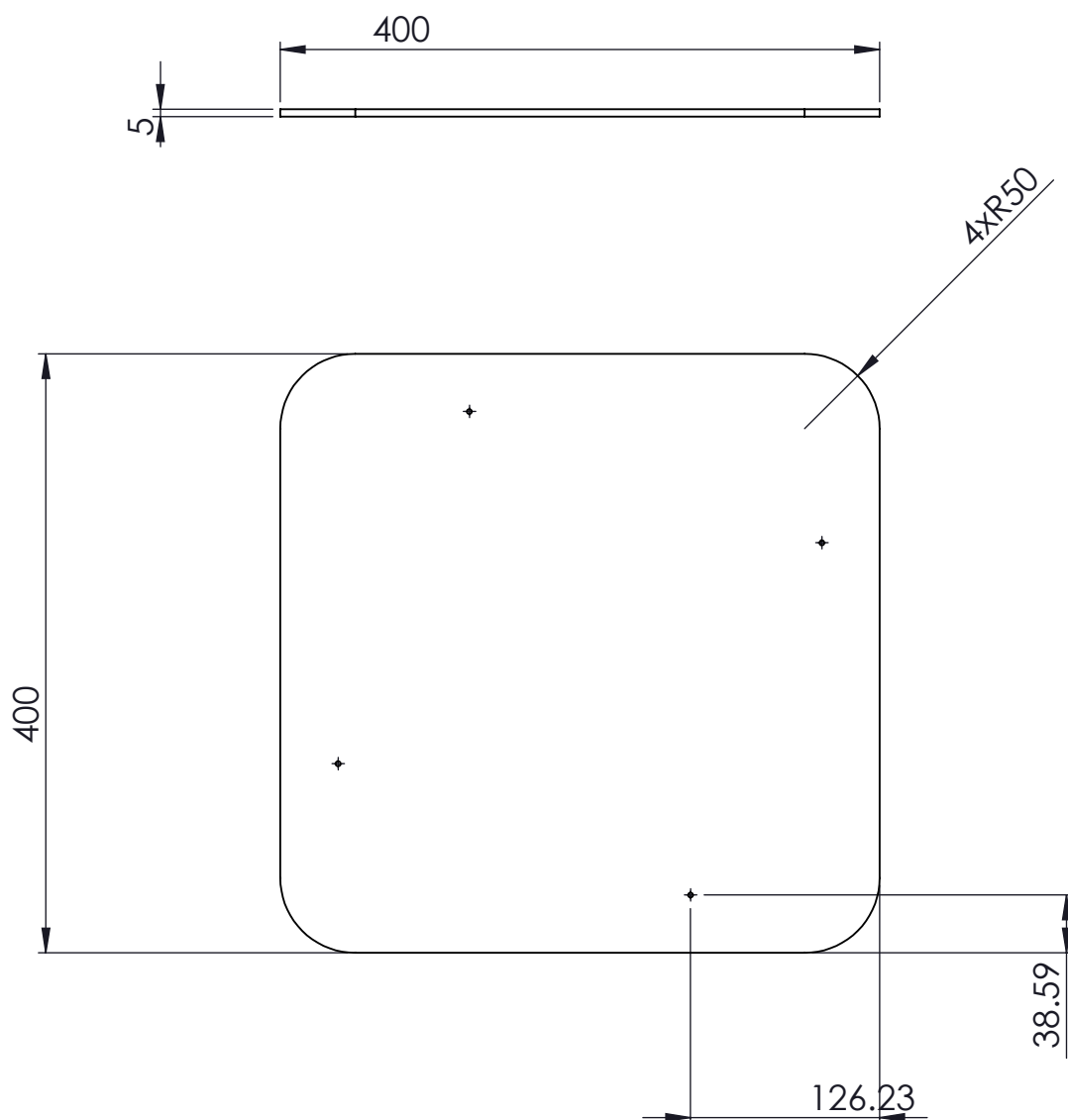
6		Kaamera kinnitus 1	TN 18/140456 C 01 05 D	1	
5		Kaamera kinnitus 2	TN 18/140456 C 01 06 D	1	
4		Kaamera		1	
3		Kinnitus element	TN 18/140456 C 01 04 D	1	
2		Kupli alus	TN 18/140456 C 01 03 D	1	
1		Kuppel	TN 18/140456 C 01 01 D	1	
Osa	Väli	Nimetus, materjal	Tähis	Hulk	Märkus:
		Materjal:	Näitamata piirhääbed: ISO 2768-m	Mass 2827g	Mööit
Teostas	Hendrik-Kristjan Sikk	Kupli koost			
Kontrollis	Erkki Jõgi				
Kinnitas	Erkki Jõgi				
EMÜ TS-TN		Leht: 1/7	Tähis: TN 18/140456 C 01 00 K		



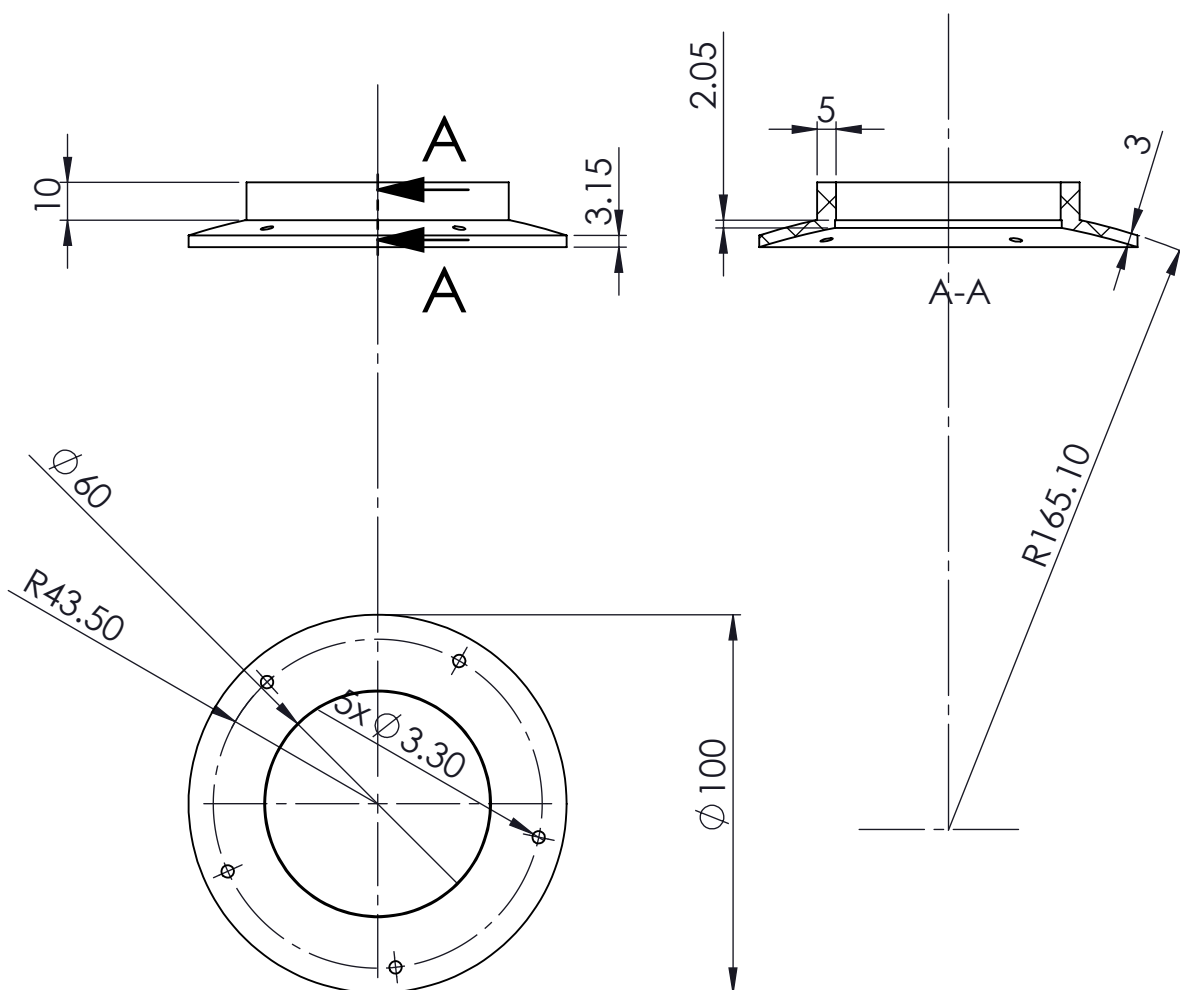
	Materjal: Akrüülnitriilbutadienstüreen		Näitamata piirhääbed: ISO 2768-m	Mass 631g	Mõõt 1:5
Teostas	Hendrik-Kristjan Sikk	Nimetus:  Kuppel			
Kontrollis	Erkki Jõgi				
Kinnitas	Erkki Jõgi				
EMÜ TS-TN		Leht: 2/7	Tähis: TN 18/140456 C 01 01 D		



	Materjal: Akrüülnitriilbutadienstüreen		Näitamata piirhääbed: ISO 2768-m	Mass 631g	Möötl 1:5
Teostas	Hendrik-Kristjan Sikk	Nimetus: Kuppel 2			
Kontrollis	Erkki Jõgi				
Kinnitas	Erkki Jõgi				
EMÜ TS-TN		Leht: 3/7	Tähis: TN 18/140456 C 01 02 D		

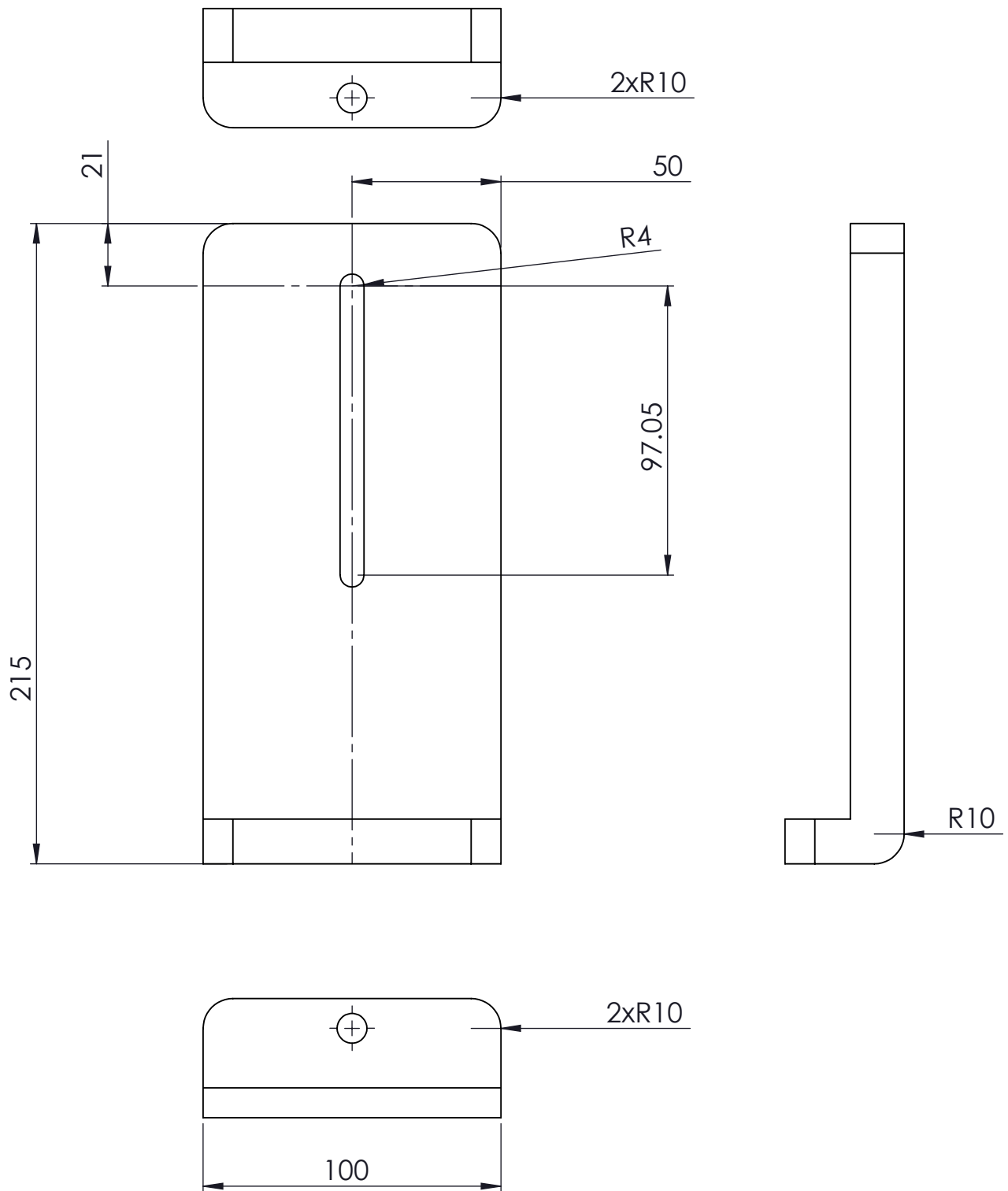


	<i>Materjal:</i> <i>Polüoksümetüleen</i>		<i>Näitamata piirhääbed:</i> <i>ISO 2768-m</i>	<i>Mass</i> <i>804g</i>	<i>Mööõt</i> <i>1:5</i>
<i>Teostas</i>	Hendrik-Kristjan Sikk	<i>Nimetus:</i>  <i>Kupli alus</i>			
<i>Kontrollis</i>	Erkki Jõgi				
<i>Kinnitas</i>	Erkki Jõgi				
<i>EMÜ TS-TN</i>		<i>Leht:</i> <i>4/7</i>	<i>Tähis:</i> <i>TN 18/140456 C 01 03 D</i>		

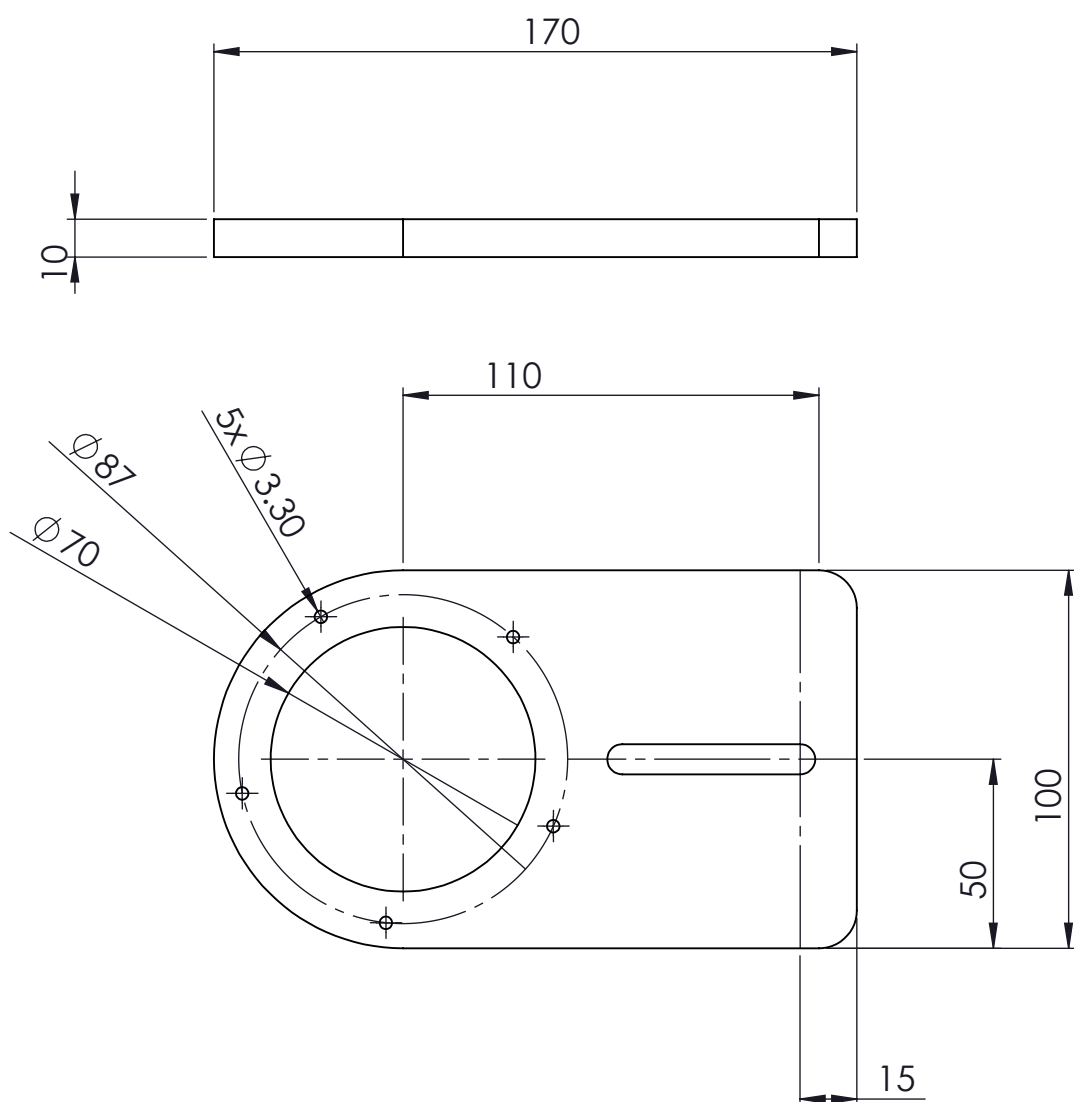


	<i>Materjal:</i> Akrüülnitriilbutadienstüreen		<i>Näitamata piirhäbed:</i> ISO 2768-m	<i>Mass</i> 26g	<i>Mööõt</i> 1:2
<i>Teostas</i>	Hendrik-Kristjan Sikk	<i>Nimetus:</i> Kinnitus element			
<i>Kontrollis</i>	Erkki Jõgi				
<i>Kinnitas</i>	Erkki Jõgi				
EMÜ TS-TN		<i>Leht:</i> 5/7	<i>Tähis:</i> TN 18/140456 C 01 04 D		



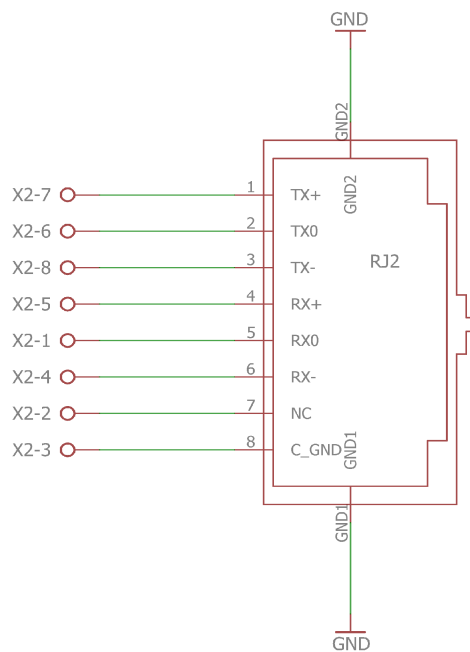
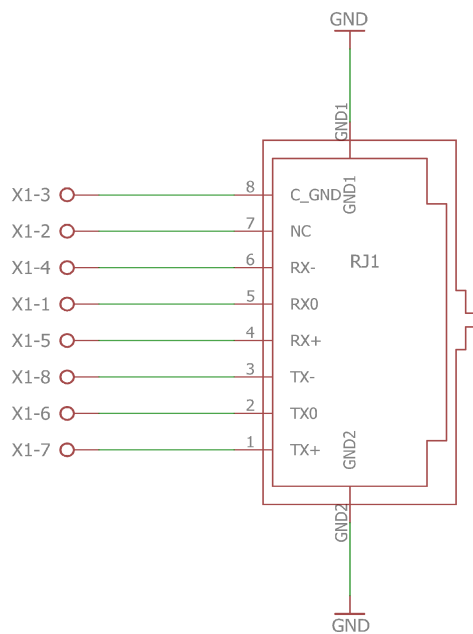


	<i>Materjal:</i> Akrüülnitriilbutadieenstüreen		<i>Näitamata piirhäbed:</i> ISO 2768-m	<i>Mass</i> 329g	<i>Mööõt</i> 1:2
<i>Teostas</i>	Hendrik-Kristjan Sikk	<i>Nimetus:</i> Kaamera kinnitus 1			
<i>Kontrollis</i>	Erkki Jõgi				
<i>Kinnitas</i>	Erkki Jõgi				
EMÜ TS-TN		<i>Leht:</i> 6/7	<i>Tähis:</i> TN 18/140456 C 01 05 D		



	Materjal: Akrüülnitriilbutadiieenstüreen		Näitamata piirhääbed: ISO 2768-m	Mass 117g	Mööõt 1:5
Teostas	Hendrik-Kristjan Sikk	Nimetus: Kaamera kinnitus 2			
Kontrollis	Erkki Jõgi				
Kinnitas	Erkki Jõgi				
EMÜ TS-TN		Leht: 7/7	Tähis: TN 18/140456 C 01 06 D		

**LISA D**



RJ2	RJ45 Port		1	
RJ1	RJ45 Port		1	
X2	kruviterminal		1	
X1	kruviterminal		1	
Tähis	Nimetus		Hulk	Märkus:
Tellija		Objekt, seade Ühendusmoodul		
Teostas	Hendrik-Kristjan Sikk	Nimetus: Ühendusmoodul		
Kontrollis	Erkki Jõgi			
Kinnitas	Erkki Jõgi			
EMÜ TS-TN		Leht: 1/1	Tähis: TN 18/140456 D 01 00 S	

**LISA E**

LISA E RTI seadme juhtprogramm

```
#define F_CPU 2000000UL
#include <avr/io.h>
#include <util/delay.h>

int main(void)
{
    MCUCR |= (1<<JTD);                // tee JTAG          ↗
    vöimetuks
    MCUCR |= (1<<JTD);
    DDRB = 0xFF;                       // PORT B väljund
    DDRD = 0xFF;                       // PORT D väljund
    DDRF = 0xFF;                       // PORT F väljund
    PORTB = (0<<PB1);                 // Omista          ↗
    väärtused values
    PORTD = (0<<PD0 | (0<<PD1) | (0<<PD2) | (0<<PD3) | (0<<PD4));
    PORTF = (0<<PF5 | (0<<PF1) | (0<<PF4) | (0<<PF7) | (0<<PF6));

    while (1)
    {
        PORTD = (1<<PD0 | (0<<PD1) | (0<<PD2) | (0<<PD3) | (0<<PD4)); // LED MATRIX  ↗
        väärtustamine
        PORTF = (1<<PF5 | (0<<PF1) | (0<<PF4) | (0<<PF7) | (0<<PF6)); // LED MATRIX  ↗
        väärtustamine

        PORTB = (1<<PB1);              // TAKTI LED

        _delay_ms(1000);               //Viivitus

        PORTD = (1<<PD0 | (0<<PD1) | (0<<PD2) | (0<<PD3) | (0<<PD4));
        PORTF = (0<<PF5 | (1<<PF1) | (0<<PF4) | (0<<PF7) | (0<<PF6));

        PORTB = (0<<PB1);
        _delay_ms(1000);

        PORTD = (1<<PD0 | (0<<PD1) | (0<<PD2) | (0<<PD3) | (0<<PD4));
        PORTF = (0<<PF5 | (0<<PF1) | (1<<PF4) | (0<<PF7) | (0<<PF6));

        PORTB = (1<<PB1);
        _delay_ms(1000);

        PORTD = (1<<PD0 | (0<<PD1) | (0<<PD2) | (0<<PD3) | (0<<PD4));
        PORTF = (0<<PF5 | (0<<PF1) | (0<<PF4) | (1<<PF7) | (0<<PF6));

        PORTB = (0<<PB1);
        _delay_ms(1000);

        PORTD = (1<<PD0 | (0<<PD1) | (0<<PD2) | (0<<PD3) | (0<<PD4));
```

```
PORTF = (0<<PF5 | (0<<PF1) | (0<<PF4) | (0<<PF7) | (1<<PF6));
```

```
PORTB = (1<<PB1);  
_delay_ms(1000);
```

```
PORTD = (0<<PD0 | (1<<PD1) | (0<<PD2) | (0<<PD3) | (0<<PD4));  
PORTF = (1<<PF5 | (0<<PF1) | (0<<PF4) | (0<<PF7) | (0<<PF6));
```

```
PORTB = (0<<PB1);  
_delay_ms(1000);
```

```
PORTD = (0<<PD0 | (1<<PD1) | (0<<PD2) | (0<<PD3) | (0<<PD4));  
PORTF = (0<<PF5 | (1<<PF1) | (0<<PF4) | (0<<PF7) | (0<<PF6));
```

```
PORTB = (1<<PB1);  
_delay_ms(1000);
```

```
PORTD = (0<<PD0 | (1<<PD1) | (0<<PD2) | (0<<PD3) | (0<<PD4));  
PORTF = (0<<PF5 | (0<<PF1) | (1<<PF4) | (0<<PF7) | (0<<PF6));
```

```
PORTB = (0<<PB1);  
_delay_ms(1000);
```

```
PORTD = (0<<PD0 | (1<<PD1) | (0<<PD2) | (0<<PD3) | (0<<PD4));  
PORTF = (0<<PF5 | (0<<PF1) | (0<<PF4) | (1<<PF7) | (0<<PF6));
```

```
PORTB = (1<<PB1);  
_delay_ms(1000);
```

```
PORTD = (0<<PD0 | (1<<PD1) | (0<<PD2) | (0<<PD3) | (0<<PD4));  
PORTF = (0<<PF5 | (0<<PF1) | (0<<PF4) | (0<<PF7) | (1<<PF6));
```

```
PORTB = (0<<PB1);  
_delay_ms(1000);
```

```
PORTD = (0<<PD0 | (0<<PD1) | (1<<PD2) | (0<<PD3) | (0<<PD4));  
PORTF = (1<<PF5 | (0<<PF1) | (0<<PF4) | (0<<PF7) | (0<<PF6));
```

```
PORTB = (1<<PB1);  
_delay_ms(1000);
```

```
PORTD = (0<<PD0 | (0<<PD1) | (1<<PD2) | (0<<PD3) | (0<<PD4));  
PORTF = (0<<PF5 | (1<<PF1) | (0<<PF4) | (0<<PF7) | (0<<PF6));
```

```

PORTB = (0<<PB1);
_delay_ms(1000);

PORTD = (0<<PD0 | (0<<PD1) | (1<<PD2) | (0<<PD3) | (0<<PD4));
PORTF = (0<<PF5 | (0<<PF1) | (1<<PF4) | (0<<PF7) | (0<<PF6));

PORTB = (1<<PB1);
_delay_ms(1000);

PORTD = (0<<PD0 | (0<<PD1) | (1<<PD2) | (0<<PD3) | (0<<PD4));
PORTF = (0<<PF5 | (0<<PF1) | (0<<PF4) | (1<<PF7) | (0<<PF6));

PORTB = (0<<PB1);
_delay_ms(1000);

PORTD = (0<<PD0 | (0<<PD1) | (1<<PD2) | (0<<PD3) | (0<<PD4));
PORTF = (0<<PF5 | (0<<PF1) | (0<<PF4) | (0<<PF7) | (1<<PF6));

PORTB = (1<<PB1);
_delay_ms(1000);

PORTD = (0<<PD0 | (0<<PD1) | (0<<PD2) | (1<<PD3) | (0<<PD4));
PORTF = (1<<PF5 | (0<<PF1) | (0<<PF4) | (0<<PF7) | (0<<PF6));

PORTB = (0<<PB1);
_delay_ms(1000);

PORTD = (0<<PD0 | (0<<PD1) | (0<<PD2) | (1<<PD3) | (0<<PD4));
PORTF = (0<<PF5 | (1<<PF1) | (0<<PF4) | (0<<PF7) | (0<<PF6));

PORTB = (1<<PB1);
_delay_ms(1000);

PORTD = (0<<PD0 | (0<<PD1) | (0<<PD2) | (1<<PD3) | (0<<PD4));
PORTF = (0<<PF5 | (0<<PF1) | (1<<PF4) | (0<<PF7) | (0<<PF6));

PORTB = (0<<PB1);
_delay_ms(1000);

PORTD = (0<<PD0 | (0<<PD1) | (0<<PD2) | (1<<PD3) | (0<<PD4));
PORTF = (0<<PF5 | (0<<PF1) | (0<<PF4) | (1<<PF7) | (0<<PF6));

PORTB = (1<<PB1);
_delay_ms(1000);
PORTD = (0<<PD0 | (0<<PD1) | (0<<PD2) | (1<<PD3) | (0<<PD4));

```



```

PORTF = (0<<PF5 | (0<<PF1) | (0<<PF4) | (0<<PF7) | (1<<PF6));

PORTB = (0<<PB1);
_delay_ms(1000);

PORTD = (0<<PD0 | (0<<PD1) | (0<<PD2) | (0<<PD3) | (1<<PD4));
PORTF = (1<<PF5 | (0<<PF1) | (0<<PF4) | (0<<PF7) | (0<<PF6));

PORTB = (1<<PB1);
_delay_ms(1000);

PORTD = (0<<PD0 | (0<<PD1) | (0<<PD2) | (0<<PD3) | (1<<PD4));
PORTF = (0<<PF5 | (1<<PF1) | (0<<PF4) | (0<<PF7) | (0<<PF6));

PORTB = (0<<PB1);
_delay_ms(1000);

PORTD = (0<<PD0 | (0<<PD1) | (0<<PD2) | (0<<PD3) | (1<<PD4));
PORTF = (0<<PF5 | (0<<PF1) | (1<<PF4) | (0<<PF7) | (0<<PF6));

PORTB = (1<<PB1);
_delay_ms(1000);

PORTD = (0<<PD0 | (0<<PD1) | (0<<PD2) | (0<<PD3) | (1<<PD4));
PORTF = (0<<PF5 | (0<<PF1) | (0<<PF4) | (1<<PF7) | (0<<PF6));

PORTB = (0<<PB1);
_delay_ms(1000);

PORTD = (0<<PD0 | (0<<PD1) | (0<<PD2) | (0<<PD3) | (1<<PD4));
PORTF = (0<<PF5 | (0<<PF1) | (0<<PF4) | (0<<PF7) | (1<<PF6));

PORTB = (1<<PB1);
_delay_ms(1000);
}
}

```

**Lisa F. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Mina, Hendrik-Kristjan Sikk,

*(autori nimi)*

sünniaeg 1989,

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa(lihtlitsentsi) enda loodud lõputöö

Reljeefi pildistamise seade,

*(lõputöö pealkiri)*

mille juhendaja on Erkki Jõgi,

*(juhendaja nimi)*

1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,

1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja

1.3. Veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor \_\_\_\_\_

*(allkiri)*

Tartu, \_\_\_\_\_

*(kuupäev)*

---

**Juhendaja kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Luban lõputöö kaitsmisele.

\_\_\_\_\_  
*(juhendaja nimi ja allkiri)*

\_\_\_\_\_  
*(kuupäev)*